

SPO 空地协同运行模式下的风险因素研究

汪磊,肖芯蕊,洪瑞媛

(中国民航大学安全科学与工程学院,天津 300300)

摘要: 单一飞行员驾驶(SPO, single pilot operation)模式随着商用航空的快速发展备受关注。为了达到不低于双飞行员操作(DPO, double pilot operation)模式的安全水平,本文对SPO模式的关键风险因素进行了识别。首先,系统且简要地描述SPO概念框架,以最安全(机长和飞行状态均正常)和最危险(机长失能,飞行状态异常)的运行情况为例,分析SPO较优模式框架;其次,基于该框架并结合文献研究法从“人—机—环—管”角度划分初选风险因素集;最后,通过专家问卷评分,使用连续区间有序加权平均(C-OWA, continuous interval ordered weighted averaging)算法确定关键风险因素。结果表明,空地协同运行模式为当前较优模式。同时,SPO运行场景中的3个关键风险因素分别为机长失能、机长岗位胜任力不足和航电系统故障。本研究可为SPO风险管控和技术发展提供理论依据。

关键词: 单一飞行员驾驶(SPO);空地协同运行模式;问卷调查;风险识别

中图分类号: V323.11

文献标志码: A

文章编号: 1674-5590(2026)02-0019-07

Research on risk factors under SPO air-ground collaborative operation mode

WANG Lei, XIAO Xinrui, HONG Ruiyuan

(College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: The single pilot operation (SPO) mode is getting much attention with the rapid development of commercial aviation. In order to achieve a safety level not inferior to double pilot operation (DPO) mode, this study identified key risk factors in the SPO mode. Firstly, this study described the SPO framework systematically and briefly. Taking the safest operation situation (captain and flight status were normal) and the most dangerous operation situation (captain incapacitation and flight problems) as examples, the optimal SPO mode framework was analyzed. Then, based on this framework and combining the literature research method, the preliminarily selected risk factor set was classified from the perspective of human, machine, environment and management. Finally, through expert questionnaire scoring, the continuous interval ordered weighted averaging (C-OWA) algorithm was used to determine the key risk factors. Results show that the air-ground collaborative operation mode is currently the optimal mode. Meanwhile, the three key risk factors in the SPO operation scenario are captain incapacity, insufficient competency of the captain position and avionics system failure. This study can provide a theoretical basis for the risk control and technological development of SPO.

Key words: single pilot operation (SPO); air-ground collaborative operation mode; questionnaire survey; risk identification

随着通信导航技术的发展和自动化系统设备水平的提升,在保证安全性和可行性的基础上,驾驶舱机组人员从早期5人制成功过渡到目前最普遍的双飞行员操作(DPO, double pilot operation)模式^[1]。相关数据显示^[2-5],当前培养成熟飞行员的时间周期和经济成本逐渐增加。在此情况下,航空公司为了提升经济效益和降低经营投入成本,亟须对飞行机组配置和驾

驶舱资源分配开展进一步的调整。在技术创新和市场需求的双重驱动下,单一飞行员驾驶(SPO, single pilot operation)模式成为航空领域的重点研究方向。SPO模式是指一名飞行员在驾驶舱自动化系统或地面站的辅助下,甚至在三方结合形成的空地协同模式下顺利完成飞行任务^[6]。其不仅能够减少驾驶舱飞行机组成员数量、缩小驾驶舱空间并减轻重量,而且可以有效

提高航空经济性,削弱 DPO 模式下信息判断和沟通理解方面存在的差异影响。

美国国家航空航天局^[7]率先在技术会议上对 SPO 模式进行了系统性描述,讨论了驾驶舱工作负荷管理、人机交互任务分配以及面临的风险等问题,为国内外 SPO 模式设计和运用奠定了基础。在设计空地协同运行框架方面,大多数国外学者聚焦于人机功能分配^[8-11],文献[6]基于飞行操作条件,分析地面不同类型操作员的职责,引入飞行员与自动化系统功能分配框架,从人机协作角度对驾驶舱自动化系统提出需求。随着对 SPO 模式研究的不断推进,部分学者探究了公众对 SPO 模式态度的影响因素^[12-14],文献[15]采用在线问卷调查的方法,表明公众广泛接受 SPO 的前提是确保飞行员健康状态和可接受的工作量,强调技术的可靠性。

国内通过借鉴国外的模式架构,逐步开展了模拟实验。文献[16]构建了空地协同框架,讨论 SPO 模式下不同场景和不同飞行阶段的组织架构,并通过演示验证指出发展 SPO 的远程操控需求,即驾驶舱自动化系统升级、地面站功能细化和稳固的通信传输。中国商用飞机有限责任公司牵头支持智能驾驶舱应用,设计了针对 SPO 模式的人机协同辅助驾驶系统^[17]。很多学者侧重从生理指标、任务绩效等方面分析 SPO 模式下飞行员的工作负荷,利用不同方法和模型解决飞行员认知过载、人机交互决策以及功能动态分配等问题^[18-21]。

综上所述,国内外学者正在逐渐深入对 SPO 模式的研究,但尚未有针对 SPO 运行场景风险因素的探讨。鉴于此,本研究将分析 SPO 空地协同运行模式的组织架构及其优越性,识别 SPO 运行场景中的关键风险因素,可为 SPO 模式下驾驶舱技术优化和预防事故发生奠定理论基础。

1 SPO 模式运行下驾驶舱分布模式分析

在 DPO 模式中,作为操作飞行员(PF, pilot flying)的机长和作为监控飞行员(PM, pilot monitoring)的副驾驶相互配合执行飞行任务,减少 PM 后将会面临巨大的安全挑战。因此,从 DPO 向 SPO 过渡是一个复杂的过程,涉及人员协调、操作程序以及角色职责等问题,在此基础上,相关研究提出了多种 SPO 模式概念框架。依据文献[6]提出的 5 种驾驶舱布局概念和文献[9]总结的 7 种模式框架,在排除完全不可行的模式后,呈现出 3 种有一定价值性的 SPO 模式。

1)模式一

用先进的驾驶舱智能化系统完全代替 PM,监控飞机当前和预计轨迹状态,及时进行错误检查,配合 PF 的指令。

2)模式二

用地面操作人员完全代替 PM,通过高速稳定的空地通信链路实现远程配合,提供一对多的地面支持。

3)模式三

由机长、驾驶舱智能化系统、地面操作人员(地面辅助系统)共同实现空地协同运行,空地协同运行模式框架如图 1 所示。



图 1 空地协同运行模式框架

Fig.1 Framework of air-ground collaborative operation mode

一般情况下,机长作为 PF 要承担 PM 的部分责任,接收相关信息并完成处置任务,而剩余职责则由驾驶舱智能化系统和地面站承担;驾驶舱智能化系统在自动驾驶和飞行信息集成等功能的基础上,附加了语音识别与理解、视觉扫描与感知、计划分析与执行以及认知评估与告警等功能,可对机长实时状态、飞行系统运转情况和环境参数持续监测,同时,其作为双向媒介,实现空地运行信息的双向反馈,为人机交互提供“显控一体化”的新配置;地面操作人员除了要执行传统调度、空中交通管制协调和气象信息分析与传递等任务以外,还应在机长失能或请求协助等异常状态和高工作负荷下,利用地面辅助系统发出指令以联动驾驶舱智能化系统进行远程操控。

从模式本身的特点来看,模式一经济性较高,但缺乏处理突发事件的灵活性,存在态势感知局限的问题,且目前的技术令其无法完全达到人的工作水平;模式二价值性最低,其高度依赖空地通信链路,地面操作人员可能面临通信故障问题,即使能获取相关数据,但无法真实同步感知驾驶舱内部情况,而且一对多的高工作负荷使其难以提供精确的支持;模式三提出了三方协同的概念,相较于前两个模式而言,能实

现更全面的信息共享和协同决策,可以提高应对能力和决策效率,有一定的安全冗余,但关键是需要通过高速稳定的通信链路进行空地任务分配和构建动态监测机制。

从飞机运行状态来看,SPO 模式下机长状态(生理和行为状况)和飞行状态(除机长状态之外影响飞行的因素)会随时发生变化,而最安全和最危险的极端情况可以在一定程度上反映 SPO 模式运行的最低和最高配置需求。因此,结合上述状态将 SPO 模式的运行条件划分为以下 4 种情况:①机长状态正常且飞行状态正常;②机长状态正常,飞行状态异常;③机长失能,飞行状态正常;④机长失能且飞行状态异常。SPO 模式运行条件分类如表 1 所示。

表 1 SPO 模式运行条件分类

Tab.1 Classification of the SPO mode operating conditions

机长状态	飞行状态	
	飞行正常	飞行异常
机长正常	情况① · 驾驶舱机长操纵飞机,智能化系统辅助 · 地面操作人员执行多架飞机的传统调度以及监控等任务	情况② · 驾驶舱机长操纵飞机,智能化系统辅助 · 地面操作人员协助机长提供一对一的远程副驾驶支持
机长失能	情况③ · 地面操作人员承担驾驶舱机长的职责 · 智能化系统与其交互配合执行命令	情况④ · 1 名地面操作人员承担机长职责操纵飞行 · 其他地面人员和可用机载系统辅助

在理想的最安全运行条件下(情况①),3 种模式都能达到可靠的运行要求;在最危险的运行条件下(情况④),模式一和模式二单一替代方案的系统鲁棒性较差,存在单方异常无法察觉并及时处理以保证正常飞行的问题,易导致机长工作负荷增加,不能完全满足要求;而模式三的冗余和容错性较高,在覆盖复杂风险场景的同时可以分散单点故障风险。通过对比分析可知,模式三的可行性和价值性相对较高。结合已有研究的验证^[22],"机长+驾驶舱智能化系统+地面站"的空地协同运行模式具备应对难以预知的危及飞行安全情况的能力,是 SPO 概念框架中相对优越的模式构型。

2 SPO 模式运行场景关键风险因素分析

为达到 SPO 模式商业化的安全目标,降低风险水平,优先采取针对性策略和技术手段进行风险管理,需要识别出运行场景中的关键风险因素,主要包含指

标筛选和权重排序。

2.1 研究方法

2.1.1 问卷调查对象

问卷调查对象主要为有飞行从业经验或民航人因研究经验的专家。课题组于 2025 年 3 月 20 日向某航空公司及某民航高校线上发放 21 份问卷,回收有效数据 20 份,回收率达到 95.24%。

2.1.2 研究工具

1) 文献筛选与收集

利用中国知网和谷歌学术以“单一飞行员驾驶模式”和“风险”进行主题词、篇名和关键词检索,检索时限截至 2025 年 4 月 22 日,共检索出相关文献 42 篇,通过剔除重复且无关的文献,最终确定 20 篇相关文献。遵循因素出现 2 次及以上的纳入标准,筛选出现度较高的因素构成初选风险因素集。

2) 专家问卷

专家问卷包含 4 部分:第 1 部分为问卷目的说明,包括研究主题、调查背景、调查目的、隐私保护等内容;第 2 部分为专家基本情况,共 9 题,包含学历、研究方向、从业时间、单位性质等;第 3 部分为 SPO 空地协同运行模式相关问题,共 4 题,涉及对未来飞机自动化驾驶的看法、SPO 设计理念、运行场景风险熟悉程度和判断依据等;第 4 部分为初选风险因素集评分,根据文献中提取的风险因素,设置各因素评分区间为 1~5 分,分值越高代表专家认为此风险因素的重要性程度越大。

2.1.3 统计学方法

通过文献研究法选取 SPO 风险因素,按照“人一机一环一管”标准划分。结合专家问卷,利用专家权威系数衡量专家问卷的权威性,通过 SPSS 27.0 软件计算克隆巴赫系数和量表水平的平均内容效度指数来分析信效度。根据评分结果,使用 Matlab 运行连续区间有序加权(C-OWA, continuous interval ordered weighted averaging)算法计算风险因素的相对权重,最终利用“二八法则”确定 SPO 模式关键风险因素。

2.2 结果

2.2.1 风险因素筛选

经过文献筛选,共选取 12 个初选风险因素,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,排名前 3 的风险因素分别为机长岗位胜任力不足、自动化系统故障和机长失能。利用“人一机一环一管”理论将上述 12 个风险因素及其出现次数从 4 个维度进行细分,结果如图 2 所示。

表 2 基于文献分析的初选风险因素

Tab.2 Preliminarily selected risk factors based on literature analysis

参考文献	风险因素											
	机长岗位 胜任力不足	航电系统 故障	空地数据 链路故障	机长 失能	自动化系 统故障	复杂 天气	自动化监控 功能局限	地面远程操控 人员能力不足	机长工作 负荷过载	动态任务 分配不当	空域 流量大	监管体系 缺陷
[6]	√	√	√	√	√	√	—	√	√	—	—	—
[8]	√	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
[10]	√	—	—	√	√	—	—	—	—	—	—	—
[11]	—	√	√	√	—	√	—	√	—	√	—	—
[18]	√	—	—	—	√	—	—	—	—	—	—	—
[19]	√	—	—	√	—	—	—	—	√	—	—	—
[23]	√	—	—	—	√	—	√	—	—	—	—	—
[24]	—	—	√	√	√	—	—	—	—	—	—	√
[25]	√	—	—	—	—	—	—	—	√	—	—	—
[26]	√	—	√	√	√	—	—	—	√	—	—	—
[27]	—	—	—	√	√	—	√	√	√	√	—	√
[28]	√	√	—	—	√	√	—	—	—	—	√	—
[29]	√	—	√	—	√	—	—	—	√	—	—	√
[30]	√	—	—	√	√	—	√	—	—	√	—	—
[31]	√	√	√	—	√	—	—	—	—	—	√	√
[32]	√	√	√	—	—	—	—	—	√	—	—	—
[33]	√	—	√	—	√	—	—	—	—	√	—	—
[34]	—	—	—	√	—	—	—	—	—	—	—	—
[35]	√	—	—	—	—	—	—	—	√	—	—	—
[36]	√	—	—	√	—	—	√	—	—	—	—	√

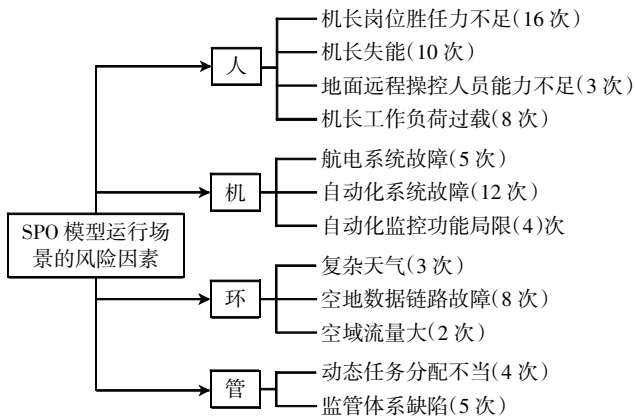


图 2 初选风险因素集 的树状图框架

Fig.2 Tree diagram framework of the preliminarily selected risk factors set

图 2 中,“人”是指参与到 SPO 空地协同运行模式中的核心人员,即机长和地面操作人员,其风险因素有机长岗位胜任力不足、机长失能、地面远程操控人员能力不足和机长工作负荷过载;“机”是指 SPO 模式运行时飞机各类机载设备和地面设施,主要风险因素有航电系统故障、自动化系统故障和自动化监控功能局限;“环”是指空地协同运行的外部环境影响,相关因素有复杂天气、空地数据链路故障和空域流量大;“管”是指空地运行环境下空管部门、航空公司等

制定的组织框架、工作程序以及标准规范,其风险因素包含动态任务分配不当和监管体系缺陷。

机长岗位胜任力不足是指机长在执行飞行任务中所需的各种能力、经验态度和心理素质等方面的综合性缺陷;航电系统故障是指飞机驾驶舱内的机载系统异常;空地数据链路故障是指空地双向数据传输时信号不稳定、通信中断和延迟等问题;机长失能是指驾驶舱内唯一的飞行员因生理或心理影响无法驾驶飞机使其安全运行;自动化系统故障是指驾驶舱智能化系统出现响应失效、人机交互接口不稳定、功能异常等问题;复杂天气是指对飞行安全有不利影响和挑战的气象状况;自动化监控功能局限是指驾驶舱智能化系统监测能力不足,在目标识别、异常监测或状态跟踪等核心监控任务中存在技术短板;地面远程操控人员能力不足是指地面操作人员在远程操控方面的知识、技能、认知等能力欠缺,导致出现操作失误、应对不力等情况;机长工作负荷过载是指飞行过程中机长工作量大或疲劳产生的危险;动态任务分配不当是指不同运行情况下机长、驾驶舱自动化系统、地面操作人员空地协作的任务分配不当;空域流量大是指空中交通堵塞和繁忙状况;监管体系缺陷是指航空公司和空管部门对飞行任务管理不全面、应急响应机制不

完善、培训考核有漏洞以及法规标准滞后等。

2.2.2 主观量表分析

1)描述性统计

经回收统计,20 位专家中男性居多,年龄普遍在 30 岁以下,最高学历以本科为主,从事 SPO 模式相关研究工作的年限集中在 5 a 以内。

2)专家权威程度

专家权威程度以专家对 SPO 模式运行场景风险因素的熟悉程度 e_1 、专家对风险的判断依据 e_2 、专家教育背景与经验状况 e_3 为衡量标准,结果如表 3—表 5 所示。

表 3 专家对 SPO 模式运行场景风险因素的熟悉程度

Tab.3 Familiarity of experts with risk factors in SPO mode operation scenarios

专家熟悉程度	人数	赋值	e_1
非常熟悉	3	1.0	3.0
比较熟悉	10	0.8	8.0
一般	5	0.6	3.0
不太熟悉	2	0.4	0.8
不熟悉	0	0.2	0.0
总和	20	—	0.740(均值)

表 4 专家对风险的判断依据

Tab.4 Criteria for experts' judgment on risks

主要依据	人数	赋值	e_2
实践研究	3	1.0	3.0
理论分析	5	0.8	4.0
同行了解	2	0.6	1.2
参考文献	6	0.4	2.4
直观感受	4	0.2	0.8
总和	20	—	0.570(均值)

表 5 专家的教育背景与经验状况

Tab.5 Educational background and experience of experts

学历与经验状况	人数	赋值	e_3	
最高学历	本科	12	0.6	7.2
	硕士	1	0.8	0.8
	博士	7	1.0	7.0
从事 SPO 相关工作年限	5 a(含以内)	12	0.4	4.8
	5~10 a	4	0.6	2.4
	10~15 a	2	0.8	1.6
	15 a 以上	2	1.0	2.0
总和	40	—	0.645(均值)	

专家权威程度一般由专家权威系数表示^[37],即三者的均值。基于已有研究^[38],通过分层赋值得到专家权威系数为 0.652,因此专家判断风险因素的权威程度较高,问卷结果有较好的可信度。

3)信效度分析

对专家问卷的量表数据进行信度和效度检验。

信度检验的计算公式可表示为

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k S_i^2}{S^2} \right) \quad (1)$$

式中: α 为克隆巴赫系数; k 为风险因素总数; S_i^2 为第 i 个风险因素得分的方差; S^2 为所有风险因素得分的方差。

效度检验的计算公式可表示为

$$I_{CVI}^i = \frac{m}{n} \quad (2)$$

$$S_{CVIAve} = \frac{\sum_{i=1}^k I_{CVI}^i}{k} \quad (3)$$

式中: I_{CVI}^i 是指第 i 个风险因素的内容效度指数; m 为对某风险因素评分为 3~5 的专家人数; n 为专家总人数; S_{CVIAve} 是指整体量表水平的平均内容效度指数。

经计算可得 $\alpha = 0.866$,说明此量表的信度非常好; $S_{CVIAve} = 0.858$,表明此量表整体有效性比较理想。

2.2.3 客观权重排序

使用 C-OWA 算法计算各风险因素的相对权重,计算过程如下。

(1)将 n 位专家对各风险因素指标的评价打分构成原始数据集。

(2)用 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 表示原始数据集。将其从大到小进行降序处理,并从 0 开始重新编号,得到新数据集 $B = b_j, j = 0, 1, \dots, n-1$ 。

(3)通过组合数 C_{n-1}^j 确定数据集 B 中 b_j 的加权权重 ω_{j+1} ,即

$$\omega_{j+1} = \frac{C_{n-1}^j}{\sum_{j=0}^{n-1} C_{n-1}^j} = \frac{C_{n-1}^j}{2^{n-1}} \quad (4)$$

(4)用 ω_{j+1} 对数据集 B 进行加权处理,可得各因素的绝对值权重 $\tilde{\omega}_i$,即

$$\tilde{\omega}_i = \sum_{j=0}^{n-1} \omega_{j+1} \times b_j \quad (5)$$

(5)将 $\tilde{\omega}_i$ 进行归一化处理,可得各因素的相对权重 W_{bi} ,即

$$W_{bi} = \frac{\tilde{\omega}_i}{\sum_{i=1}^k \tilde{\omega}_i} \quad (6)$$

通过以上步骤,可得到各风险因素相对权重,结果如图3所示。

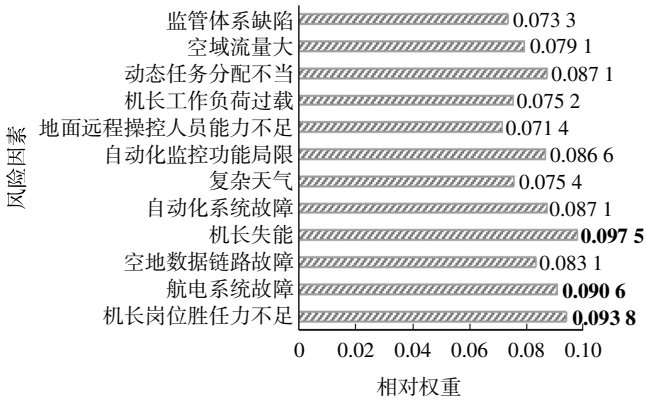


图3 各风险因素相对权重条形图

Fig.3 Bar chart of the relative weights of each risk factor

从图3可以看出,机长岗位胜任力不足的相对权重为0.0938,航电系统故障的相对权重为0.0906,空地数据链路故障的相对权重为0.0831,机长失能的相对权重为0.0975,自动化系统故障的相对权重为0.0871,复杂天气的相对权重为0.0754,自动化监控功能局限的相对权重为0.0866,地面远程操控人员能力不足的相对权重为0.0714,机长工作负荷过载的相对权重为0.0752,动态任务分配不当的相对权重为0.0871,空域流量大的相对权重为0.0791,监管体系缺陷的相对权重为0.0733。在此遵循“二八法则”,对所有风险因素权重降序排序,将权重排名前3的因素,即机长失能、机长岗位胜任力不足和航电系统故障作为SPO模式运行场景中的关键风险因素。

3 讨论

研究结果显示,SPO模式运行场景中3个关键风险因素的相对权重均高于0.0900,已经超过平均相对权重。其中,机长失能这一风险因素的相对权重达到了0.0975,说明其影响十分显著^[39]。文献[40]在分析35起飞行员失能的不安全事件致因时强调了机长失能的概率较低但后果十分严重,不容忽视。而涉及SPO模式危害识别的研究中^[41],机长失能被认为是SPO模式异常场景中发生紧急情况的关键问题所在。除此之外,机长作为最终的操控决策者,若因自身能力不足导致认知、决策和执行异常,那么原有的飞行过程会出现不可控性。航电系统作为飞机的“大脑”,直接影响飞行控制、导航及通信等核心功能,若出现故障则会导致机长操作失控或无效,严重影响安全运行,因此其也是关键风险因素之一。从“人一机一

环—管”角度来看,3个关键风险因素集中在“人”和“机”2个方面,这与相关研究的结果基本保持一致^[42]。

航空领域的危险是不可避免的,只有通过识别风险因素、深入了解潜在后果并实施防控手段,才能确保与其安全共存。虽然SPO模式部分风险与DPO模式相似,但由于缺少PM,其风险管理强度和方向有所不同。针对SPO模式下机长失能问题的关键是监管指标和监控手段,机长岗位胜任力不足需要从筛选和培训方面缓解,而航电系统故障则需要综合性技术优化或智能化系统进一步辅助。除了目前已识别出的风险因素外,SPO模式仍存在其他潜在风险。文献[43]从SPO模式下多任务运行的安全性角度出发,提出一种高效差分双聚类挖掘算法,并通过实证说明了实值资源—功能矩阵(real-valued resource—function matrixes)可以识别空地协同模式下的潜在危险或传播机制。文献[44]则利用集群算法进行多任务资源与功能冲突验证,为提升SPO模式的安全性提供了新思路。由于SPO模式是一个复杂系统,风险因素之间存在耦合性,相比于DPO模式,其运行架构需要设计3倍的安全冗余,未来需要全面地识别和研究风险因素之间潜在的耦合路径,评估风险耦合影响并进行关键控制,从而降低多重风险。

4 结语

本文通过分析3种SPO模式框架的特点和2种极端状态的运行情况,对比得出SPO模式下空地协同运行模式的价值更高。通过描述不同角色和职责的动态需求凸显出功能分配的必要性,进一步说明此模式可以作为未来SPO运行试验的核心模式。在此基础上,结合文献研究、专家问卷评分、C-OWA算法、二八法则等方法,得出SPO模式运行场景的关键风险因素为机长失能、机长岗位胜任力不足和航电系统故障;其数据来源可靠,结果有效,主要涉及“人”和“机”2个方面,后续应针对机长实时监控、SPO飞行员选拔和驾驶舱智能化技术的提升展开人因工程方面的研究。

参考文献:

[1] HARRIS D. Single-pilot airline operations: designing the aircraft may be the easy part[J]. The Aeronautical Journal, 2023, 127(1313): 1171-1191.

[2] BOEING. Commercial market outlook 2022-2041[EB/OL]. (2023-04-10) [2025-05-06]. <https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boe->

- ingdotcom/market/assets/downloads/CMO-2022-Report_FINAL_v01.pdf.
- [3] LUTTE R. An investigation of the United States airline pilot labour supply[J]. *Journal of Air Transport Studies*, 2014, 5(2): 53-83.
- [4] DUGGAR J W, SMITH B J, HARRISON J. International supply and demand for US trained commercial airline pilots[J]. *Journal of Aviation Management and Education*, 2011, 1(1):1-16.
- [5] ICAO. Global and regional 20-year forecasts: pilots, maintenance personnel, and air traffic controllers[R]. Montreal: ICAO, 2011.
- [6] MATESSA M, STRYBEL T, VU K, et al. Concept of operations for RCO/SPO[R]. Moffett Field: NASA, 2017.
- [7] COMERFORD D, BRANDT S L, LACHTER J B, et al. NASA's single-pilot operations technical interchange meeting: proceedings and findings[R]. Moffett Field: NASA, 2013.
- [8] BRANDT S L, LACHTER J, BATTISTE V, et al. Pilot situation awareness and its implications for single pilot operations: analysis of a human-in-the-loop study[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 3: 3017-3024.
- [9] NEIS S M, KLINGAUF U, SCHIEFELE J. Classification and review of conceptual frameworks for commercial single pilot operations[C]//2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC), September 23-27, 2018, London UK. IEEE, 2018: 1-8.
- [10] VU K L, LACHTER J, BATTISTE V, et al. Single pilot operations in domestic commercial aviation[J]. *Human Factors*, 2018, 60(6): 755-762.
- [11] REVELL K M A, ALLISON C, SEARS R, et al. Modelling distributed crewing in commercial aircraft with STAMP for a rapid decompression hazard[J]. *Ergonomics*, 2019, 62(2): 156-170.
- [12] MYERS P L, STARR A W. Single pilot operations in commercial cockpits: background, challenges, and options[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021,102(1): 19.
- [13] HUGHES J S, RICE S, TRAFIMOW D, et al. The automated cockpit: a comparison of attitudes towards human and automated pilots[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2009, 12(5): 428-439.
- [14] RICE S, WINTER S R, MEHTA R, et al. What factors predict the type of person who is willing to fly in an autonomous commercial airplane? [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2019, 75: 131-138.
- [15] STEWART N, HARRIS D. Passenger attitudes to flying on a single-pilot commercial aircraft[J]. *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, 2019, 9(2): 77-85.
- [16] 王 森,肖 刚,王国庆. 单一飞行员驾驶模式技术[J]. *航空学报*, 2020, 41(4): 323541.
- [17] 张新苗,余自武,杨雨绮. 人工智能在波音 787 上的应用与思考[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(6): 169-174.
- [18] 张 炯,曾 锐. 商用飞机单一飞行员驾驶模式设计及测试[J].*航空科学技术*, 2020, 31(6): 42-49.
- [19] 许 为,陈 勇,董文俊,等. 大型商用飞机单一飞行员驾驶的人因工程研究进展与展望[J]. *航空工程进展*, 2022, 13(1): 1-18.
- [20] 汪 磊,邵镗睿,吴昌旭,等. 基于 QN-MHP 模型的 SPO 人机功能分配研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(9): 183-189.
- [21] 张同荣,魏志强,时统宇. 基于 SPO 的空地协同运行模式设计[J].*中国民航大学学报*, 2020, 38(6): 12-17.
- [22] BILIMORIA K D, JOHNSON W W, SCHUTTE P C. Conceptual framework for single pilot operations[C]//Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace. Santa Clara California: ACM, 2014: 1-8.
- [23] SHERIDAN T B. Adaptive automation, level of automation, allocation authority, supervisory control, and adaptive control: distinctions and modes of adaptation[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2011, 41(4): 662-667.
- [24] JOHNSON W, LACHTER J, FEARY M, et al. Task allocation for single pilot operations: a role for the ground[C]//International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace. 2012.
- [25] GORE B F, WOLTER C. A task analytic process to define future concepts in aviation[C]// International conference on digital human modeling and applications in health, safety, ergonomics and risk management. Cham: Springer International Publishing, 2014: 236-246.
- [26] CUMMINGS M L, STIMPSON A, CLAMANN M. Functional requirements for onboard intelligent automation in single pilot operations[C]//AIAA Information Systems-AIAA Infotech & Aerospace, January 4-8, 2016, California, USA. AIAA, 2016: 1652.
- [27] STANTON N A, HARRIS D, STARR A. The future flight deck: modelling dual, single and distributed crewing options[J]. *Applied Ergonomics*, 2016, 53: 331-342.
- [28] SCHUTTE P C, GOODRICH K, COX D E, et al. The naturalistic flight deck system: an integrated system concept for improved single-pilot operations: NASA/TM-2007-215090[R]. Moffett Field: NASA Langley Research Center, 2007.
- [29] BAILEY R E, KRAMER L J, KENNEDY K D, et al. An assessment of reduced crew and single pilot operations in commercial transport aircraft operations[C]//2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), September 17-21, 2017, St. Petersburg, FL, USA. IEEE, 2017: 1-15.
- [30] HO N, JOHNSON W, PANESAR K, et al. Application of human-autonomy teaming to an advanced ground station for reduced crew operations[C]//2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), September 17-21, 2017, St. Petersburg, FL, USA. IEEE, 2017: 1-4.
- [31] SCHMID D, KORN B. A tripartite concept of a remote-copilot center for commercial single-pilot operations[C]//AIAA Information Systems-AIAA Infotech & Aerospace, January 9-13, 2017, Grapevine, Texas. AIAA, 2017: 0064.
- [32] ALPA WHITE PAPER. The dangers of single-pilot operations[R]. McLean VA: ALPA, 2019.
- [33] SCHMID D, KORN B, STANTON NA. Evaluating the reduced flight deck crew concept using cognitive work analysis and social network analysis: comparing normal and data-link outage scenarios[J]. *Cognition, Technology & Work*, 2020, 22(1): 109-124.
- [34] SOMERVILLE A, LYNAR T, WILD G. Safety implications of pilot incapacitation occurrences for future single pilot operations[C]//AIAA