

文章编号: 1674-8190(2026)03-168-09

基于蒙特卡洛模型的直升机最小飞行机组 动态验证方法研究

宋勇, 徐渊, 邹炎彰

(中国直升机设计研究所, 景德镇 333001)

摘要: 科学验证最小飞行机组配置的合理性是直升机人为因素适航认证的关键问题。为顺应航空领域对运行效率与成本管控的发展需求, 提出一种基于蒙特卡洛模型的直升机最小飞行机组动态验证方法。采用层次分解法, 依据装备人机工程要求构建多因素开放式评估指标体系; 针对直升机不同运行场景的任务复杂度与风险差异, 建立评估指标动态裁剪与权重分配流程; 确定指标阈值与分布规律, 搭建基于蒙特卡洛随机抽样与统计分析的仿真计算模型, 整合试飞、仿真等多源数据开展大规模仿真计算, 完成最小飞行机组配置合理性的量化分析。该方法已在某民用直升机适航取证中得到工程应用, 结果表明: 所构建的最小飞行机组验证方法科学合理、适用有效, 可为各类载人飞行器最小飞行机组适航取证提供参考。

关键词: 直升机; 最小飞行机组; 机组配置; 适航验证; 动态验证; 蒙特卡洛模型

中图分类号: V275⁺.1; V221⁺.91

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2026.03.17

Research on dynamic verification method of helicopter minimum flight crew based on Monte Carlo model

SONG Yong, XU Yuan, ZOU Yanzhang

(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

Abstract: Scientifically verifying the rationality of the minimum flight crew configuration is a key issue in helicopter human factors airworthiness certification. To meet the development demands of operational efficiency and cost control in the aviation industry, this paper proposes a dynamic verification method for helicopter minimum flight crew based on the Monte Carlo model. Using the hierarchical decomposition method, a multi-factor open evaluation index system is constructed in accordance with the ergonomic requirements of equipment. In view of the differences in task complexity and risk levels across various helicopter operational scenarios, a dynamic selection and weight allocation process for evaluation indexes is established. The threshold values and distribution laws of the indexes are determined, and a simulation calculation model based on Monte Carlo random sampling and statistical analysis is built. By integrating multi-source data such as flight test and simulation data, large-scale simulation computations are carried out to realize the quantitative analysis of the rationality of the minimum flight crew configuration. The proposed method has been applied in the airworthiness certification of a civil helicopter. The results show that the established minimum flight crew verification method is scientific, rational, applicable and effective, and can provide a reference for the minimum flight crew airworthiness certification of various manned aircraft.

Key words: helicopter; minimum flight crew; crew configuration; airworthiness verification; dynamic verification; Monte Carlo model

收稿日期: 2025-11-20; 修回日期: 2026-03-02

通信作者: 宋勇(1997-), 男, 学士, 工程师。E-mail: songy021@avic.com

引用格式: 宋勇, 徐渊, 邹炎彰. 基于蒙特卡洛模型的直升机最小飞行机组动态验证方法研究[J]. 航空工程进展, 2026, 17(3): 168-176.

SONG Yong, XU Yuan, ZOU Yanzhang. Research on dynamic verification method of helicopter minimum flight crew based on Monte Carlo model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2026, 17(3): 168-176. (in Chinese)

0 引言

人为因素在航空安全中的重要地位在飞机制造商、适航当局以及研究机构中已经达成共识,在直升机设计与审查过程中对人为因素的要求也越来越高,其中最小飞行机组评估是一个涉及多学科、综合、复杂的适航符合性验证问题,直接关系到飞行安全^[1]。长期以来,“最小飞行机组”条款被认为是民用飞机驾驶舱人为因素问题的首要条款^[2]。

1964年,美国民用航空条例对飞行机组的成员人数进行要求,可多达5名。随着飞机驾驶舱设计的综合、自动化发展,驾驶员工作量逐步降低,航空公司开始考虑飞行机组设置的合理性。1965年,美国联邦航空管理局(FAA)首次提出“最小飞行机组”的要求,在适航规章FAR-25.1523及其附录中提出了“最小飞行机组”和“机组工作量”的概念和适航要求^[3]。1985年,中国民用航空局正式发布《运输类飞机适航标准》(CCAR-25),其第25.1523条和附录D与FAR-25保持一致^[4]。早期的人为因素条款只是针对各个子系统进行约束,并没有从宏观的角度考虑人为因素的问题,而1523条款从机组的角度出发,对驾驶舱中最小机组的要求进行了定义,综合地考虑人为因素问题。

“最小飞行机组”是指在飞行驾驶舱的设备配置、布局等都已确定的情况下,机组成员能够没有过度的注意力集中或者感觉到疲劳,并安全完成飞行任务时所需要的最小编制人数^[5]。《运输类旋翼航空器适航规定》(CCAR-29-R2)第29.1523条规定,必须考虑下列因素规定最小飞行机组,使其足以保证安全运行:1)每个机组成员的工作量,2)有关机组成员对必需的操纵器件的可达性和操作简易性,3)按第29.1525条核准的运行类型^[6]。

以往适航审查中,人为因素考虑较分散,并未对人为因素开展专题审查^[7]。随着直升机技术的发展与民航审查能力的提升,直升机最小飞行机组条款验证向专项审查逐渐发展,考虑因素逐步增加与完善。Okine等^[8]对1950—2019年间共发生的1085起事故进行分析,指出飞行员失误导致的事故约占总数的49%;Malik等^[9]开展了减少飞行机组成员对经济和安全的影响研究,指出通过单人制机组减少机组人员可节省约4%~7%的运营成本,提高经济效益。飞行机组工作量是影响飞行安全的重要因素,随着航空自动化水平提升,

减少机组成员数量成为提高运营效率的重要方向,最小化机组配置需在飞行安全与运营成本间取得平衡,确保在多种运行场景下都能保障安全。因此,最小飞行机组验证能否基于场景动态验证,并给出准确的验证结果,将直接影响到直升机的运行安全和成本。

国外在最小飞行机组适航验证领域的研究起步早、体系化程度高,形成了“规章制定—方法创新—实证支撑”的协同发展格局。FAA在发布了FAR-25.1523规章后,通过咨询通告AC25.1523-1^[10]进一步明确了基于层次任务分析法(HTA)的标准化验证流程;欧洲航空安全局(EASA)在CS-29旋翼航空器适航规范^[11]中强化了场景化验证要求。Smith等^[12]将层次任务分析法(HTA)与NASA-TLX量表相结合,量化主观负荷与任务复杂度的相关性;Jones等^[13]针对飞行场景动态变化的特性,开发了基于机器学习的任务负荷预测模型,为最小机组配置的实时调整提供了技术支撑;Maria等^[14]从运营经济性视角出发,量化了机组人员精简对人力成本、运营效率的影响,为最小机组配置的决策提供了量化参考。

国内研究聚焦直升机设计与适航审定的实际需求,在评估方法优化与场景开发方面取得了阶段性成果。刘树强^[15]给出了最小飞行机组工作量评估流程,比较分析了库柏哈柏法、SWAT表法及NASA-TLX量表法等一系列的主观评估方法;刘昌昌^[16]提出了比较评估和独立评估两种方法;徐敏敏等^[17]明确了适航审定所需飞行场景的开发原则与核心步骤,根据飞机设计阶段的若干有针对性的飞行场景经过组合形成适用于适航审定的飞行场景。

上述验证方法验证环境静态化,难以适配动态复杂场景,评估指标单一且主观性较强,验证效率与设计前端适配性不足,受限于人力、时间等成本,无法在直升机设计前端开展预验证,无法及时反馈设计缺陷以指导优化,难以满足复杂场景下的快速评估。

针对上述问题,本文首先针对直升机驾驶舱人为因素特征,采用层次分解法建立完整的开放式评估指标体系,基于使用数据和型号经验,确定核心指标,提升评估的客观性与全面性;其次基于特定场景的需求对评估指标体系进行裁剪,明确场景规则与关键指标;然后开发基于蒙特卡洛方法构建的最小飞行机组验证计算模型,引入智能

算法实现验证最小飞行机组配置的合理性;最后通过实例验证与迭代优化,形成一套科学、高效、适配复杂场景的直升机最小飞行机组验证方法,以满足在设计前端开展复杂场景、多指标、快速迭代、定量验证的工程运用需求,为适航审定提供技术依据。

1 评估框架

本文提出的直升机最小飞行机组动态验证评估框架如图 1 所示。

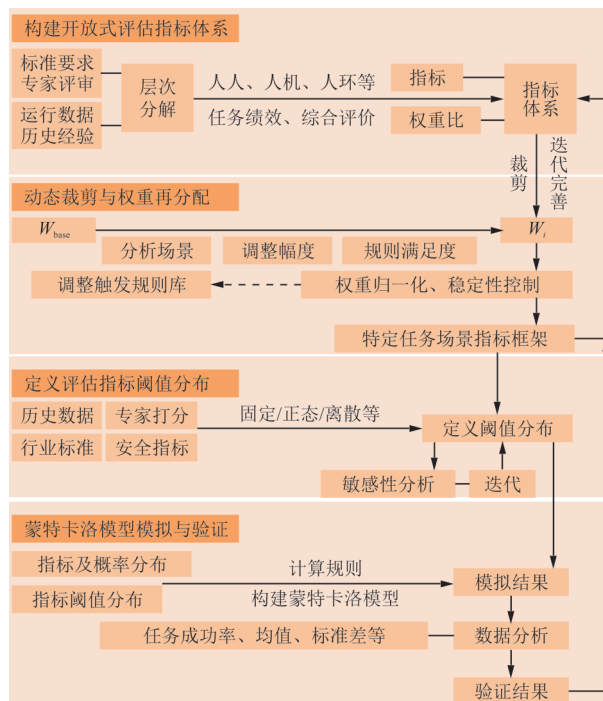


图 1 直升机最小飞行机组动态验证评估框架

Fig. 1 Dynamic verification and assessment framework for minimum flight crew of helicopter

1) 构建开放式评估指标体系。根据装备和人为因素特征,采用层次分解法,从多个方面分解评估指标,基于指标对安全性和任务完成的影响程度细化评估指标并确定权重,形成完整的开放式评估指标体系。

2) 动态裁剪与权重再分配。考虑不同场景下技能水平、个体特征、环境、任务等的影响,对开放式评估指标体系进行裁剪,对指标权重进行再分配,形成特定场景的评估指标体系。

3) 定义评估指标阈值分布。针对评估指标特征,基于历史数据、行业标准、安全性分析等方法,开展敏感度分析,给定各评估指标的阈值及其数据分布形态。

4) 蒙特卡洛模拟与验证。基于评估指标体系和阈值分布,将输入变量转化为数学模型,实现随机采样与迭代计算,根据指标体系复杂程度,设定计算量级使结果收敛,统计分析任务成功率,定量给出最小飞行机组配置验证结果。

验证过程中,可通过特定场景分析、蒙特卡洛模型计算,更新指标体系数据,迭代完善开放式评估指标体系,优化指标权重及阈值分布。

2 开放式评估指标体系构建

依据装备人机工程要求,评估指标体系可从人—人关系、人—机(硬件)关系、人—机(软件)关系、人—环关系、任务绩效等方面分析^[18],采用层次分解法,逐级分解其为多层指标,并通过专家打分、历史经验、运行数据分析等方法,确认评估指标及权重,构建开放式评估指标体系,适用于复杂系统的评估指标体系构建。

评估指标的选取通常需要遵守目的性、全面性、可行性、与评价方法的协调性等基本原则,构建评估指标体系,提供一套开放式的多级分层框架,随着验证进程可多角度地识别潜在评估指标,通过迭代优化,使评估指标体系更加完整。最小飞行机组验证一级评估指标及其初始权重分配如表 1 所示。

表 1 一级评估指标及权重分配
Table 1 Level-I evaluation indicators and weight distribution

指标	定义	权重分配
人—人关系	人与人之间团队协作、沟通、决策和冲突解决等的交互效率,包括通讯交流、任务分配、协作流畅度等对任务的影响	[0.15, 0.20]
人—机(硬件)关系	人与物理设备或工具之间交互效率和安全性,如包括硬件可用性、人体工学设计、操作舒适度、设备对人的生理负荷的影响等	[0.20, 0.30]
人—机(软件)关系	人与数字界面、算法或软件系统的交互效率。如界面友好性、响应速度、功能易用性,以及系统对用户的认知负荷的影响等	[0.20, 0.30]
人—环关系	人在环境中完成任务的效率,如温度、噪声、照明、空间布局等	[0.10, 0.15]
任务绩效	完成既定目标的最终效果和效率,如任务准确性、时间成本、资源消耗以及产出质量等	[0.15, 0.20]
其他

为增强评估指标的可操作性与数据采集的针对性,对一级指标进行细化扩展,指标分级越多,验证结果越准确,但验证难度越大,工程应用受限,一般可分解至第三级、第四级等,评估指标分级模板如图 2 所示。

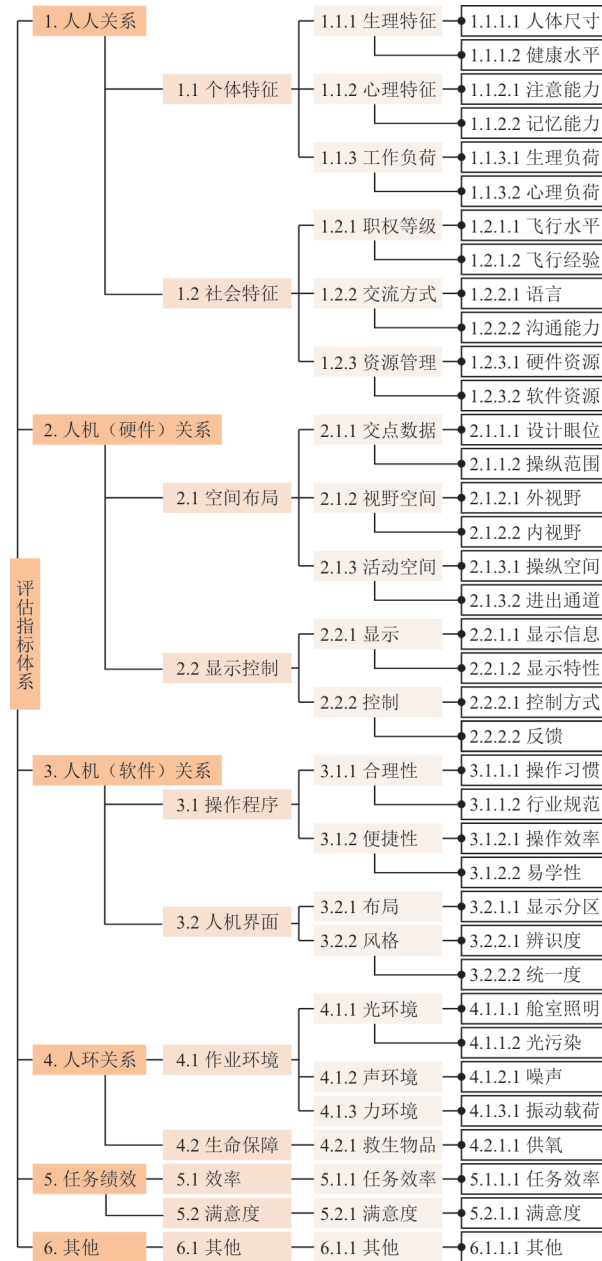


图 2 评估指标分级模板
Fig. 2 Assessment indicator grading template

3 评估指标动态裁剪与权重分配

最小飞行机组验证应包含航路、气象、机组飞行时间、设备安装状态、典型航线飞行、系统失效、应急和非正常状况、机组技能水平等因素,综合考

虑预期的运行环境、直升机自有特性等,对不同场景下的评估指标及优先级进行动态调整^[19]。例如,在不同任务复杂度、天气等的场景下,任务绩效和人—环关系指标需要进行调整;发动机应急处置场景下,可能需提高发动机失效、设备可靠度等的权重等。评估指标动态裁剪与权重分配,形成特定场景的评估指标体系,使关键指标在特定场景下获得更高的优先级,同时减少冗余因素的干扰,适用于不同场景、不同项目的特定需求。

依据对特定场景的分类,考虑不同场景下指标、优先级的动态调整,预设触发规则库,同时初步对开放式评估指标体系进行裁剪,形成初始基础权重矩阵。核查场景触发条件,根据触发规则的满足度函数定义权重的调整幅度,计算获得调整后的权重矩阵,控制稳定性,进行权重归一化处理,最终形成适用于该特定场景的评估指标体系。调整权重的过程中,可对预设的触发规则库进行迭代优化,形成的评估指标体系也可迭代完善开放式评估指标体系。评估指标动态裁剪与权重分配流程如图 3 所示。

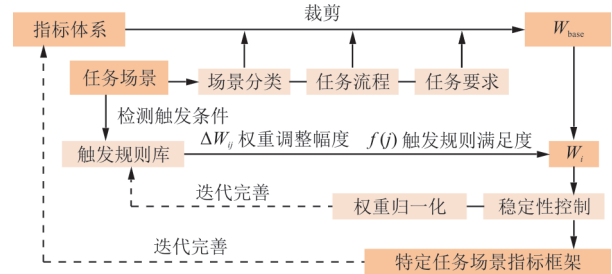


图 3 评估指标动态裁剪与权重分配流程
Fig. 3 Dynamic tailoring and weight distribution process of evaluation indicators

1) 初始化基础权重矩阵。可根据特定场景的机组任务清单、历史经验或专家评估,对开放式评估指标体系进行调整,以三级评估指标体系为例,确定初始静态权重 W_{base} , 各指标权重 w_{ij} 形成初始权重矩阵。

$$W_{base} = (w_{ij})_{N \times N} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N} \\ \vdots & \vdots & w_{ij} & \vdots \\ w_{N1} & \dots & \dots & w_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

($i, j = 1, 2, \dots, N$)

2) 检测场景触发条件。采集飞行数据、环境信息及机组操作日志等信息,基于场景分类,预设权重调整触发规则库,通过触发条件定义权重调

整,示例如表 2 所示。

表 2 权重调整触发规则库示例

Table 2 Example of trigger rule base for weight adjustment

序号	触发条件	权重调整
1	极端条件下(如单发失效)	人机关系(硬件)权重+20%
2	非紧急情况	人环关系权重-10%
3	能见度低于 500 m	人环关系权重+20%
4	自动驾驶失效	人机关系(硬件)权重+15%
5	飞行员疲劳	人人关系权重+20%
6	自动化智能驾驶	人机关系(软件)权重+15%
7	完成特定重要任务	任务绩效+15%
其他

3) 动态调整权重函数。在初始权重的基础上,根据所有触发规则对因素 ij 的权重调整幅度、触发规则的满足度,激活/抑制权重,计算因素 ij 动态调整后的权重 w_{new} :

$$w_{\text{new}} = w_{\text{base},ij} + \sum_{j=1}^n (\Delta w_{k,ij}) \cdot f(C_k) \quad (2)$$

式中: $w_{\text{base},ij}$ 为因素 ij 的初始权重; $\Delta w_{k,ij}$ 为触发规则 k 对因素 ij 的权重调整幅度; $f(C_k)$ 为触发规则 k 的满足度函数。

满足度函数的选型应充分结合指标类别及分布特征定义。对于可量化的连续型指标,如完成时间、操作准确度、响应速率等,此类指标无明确分级界限且满足度随指标数值呈平稳增减趋势,满足度函数推荐采用线性函数;对于存在明确分级阈值的定性一定量结合指标,如结果判定分为非常满足、比较满足、基本满足、不满足等多级指标,此类指标以预设阈值为分界点划分满足度区间,满足度函数推荐采用分段线性函数;对于存在最优区间的指标,如作业负荷、操纵力度、参数阈值等,此类指标的核心特点是偏离最优区间越远,满足度越低,最优区间内满足度处于峰值且相对稳定,满足度函数推荐采用正态分布型或高斯型函数。

4) 权重归一化与稳定性控制。调整后的权重 $w_{\text{new},ij}$ 需满足:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N w_{\text{new},ij} = 1 \quad (3)$$

设置最大或最小调整阈值,一般情况下单因素变化幅度不应超过 30%,即满足 $\Delta w_{k,ij}$,以防止权重过激调整,影响评估指标的敏感度和验证结果的准确度。

4 评估指标阈值分布定义

开放式评估指标体系中的每个指标都有相应的权重,但每个随机的场景下,不同指标对任务完成、飞行安全等具有不同的影响程度,想要随机抽取不同指标,定义不同场景,并进行模拟,需要定义评估指标阈值分布。

可通过程序语言 Params 设置嵌套字典,存储所有仿真参数,评估指标阈值分布可能为正态分布、概率分布或者为固定值等,这些参数可通过直升机历史运营数据、外场设备失效概率统计、飞行员职业技能水平及飞行小时等数据统计分析、人机交互自动化程度影响、专家评估等确定,也可选取参考机型,结合最小飞行机组飞行试验和模拟器试验,获取飞行机组在被评估飞机和参考机型上的主客观数据,对比分析工作量^[20]。例如,对于人—人关系中的飞行员技能水平,通过统计分析,可设定技能水平为均值 0.85、标准差 0.05 的正态分布参数;人—机关系中的系统失效,可根据失效分析设定为概率分布参数,故障概率 0.01,同时结合系统可靠度,对系统失效时的故障应急响应速度设定为均值 0.8、标准差 0.1 的正态分布参数;人—环关系中的气象条件,可根据区域气象机构发布的预报,天气良好的概率 0.8,天气较差的概率 0.1,天气恶劣的概率 0.1,同时,可结合气象条件对飞行操作的影响设定分值调整规则,如良好天气提升操作效率 20%,较差天气降低操作效率 10%,而恶劣天气降低操作效率 20%。

最后,需要定义单次计算结果为成功的界限,如综合得分大于 0.8,即认为本次模拟成功;也可根据界限范围,定义结果的等级,如特别不满意、比较不满意、一般、比较满意、非常满意等。

评估指标阈值分布定义后需要随机抽样,通过大量模拟与统计,快速给出模拟结果,包括成功率、平均分、最低分、标准差等,存在数值计算困难、数量量级庞大、工程现实模拟困难、成本高等难点。蒙特卡洛方法对数量多、阈值分布各异的评估指标进行随机抽样生成海量输入组合,通过大量级计算使结果收敛,定量评估结果与误差边界,同时蒙特卡洛模型模拟极端场景无需真实环境复现即可快速计算,几分钟内即可实现迭代运算百万量级,给出机组配置的合理性,可为以上困难提供解决方案。

5 蒙特卡洛模型建立及应用

蒙特卡洛方法(Monte Carlo Method),又被称为随机抽样方法,是伴随着计算硬件的持续进步而快速发展的数值技术路线^[21]。蒙特卡洛方法的整体理论框架是概率理论,它通过特定方式产生大量随机样本,并根据样本分布计算某种宏观量,借此解决最小飞行机组验证因素众多,试验样本数量受限、范围覆盖不全面,直升机边界条件验证等问题。其基本思路是:通过大量重复试验(即生成随机样本),对复杂系统的不确定性或未知参数进行建模,从而估算目标问题的概率分布、期望值或风险区间。

蒙特卡洛模型模拟直升机最小飞行机组验证的优势在于:

1) 高维指标分析。最小飞行机组验证指标分层分级,关系复杂且数量庞大,蒙特卡洛模型可随机动态重组最小飞行机组验证的多个变量,生成海量输入组合,触发权重调整的临界点,扩展验证边界,捕捉变量间的非线性关系。

2) 快速定量评估。以往最小飞行机组验证依赖主观性、定性评估,无法在设计前端开展预验证,而蒙特卡洛模型可直接给出量化结果,在设计初步阶段即可进行建模计算,通过几分钟内百万量级迭代运算,使得运算结果收敛,积累信息化数字工程原始数据,可通过参数设置,适用不同验证项目。另外,可结合模型进行敏感性分析,通过调整阈值,确定参数对结果的影响。

3) 安全经济高效。最小飞行机组验证试飞极端场景实现验证对飞行员技能水平要求高,安全性低,为获取有效数据需提高经济成本,蒙特卡洛模型模拟极端场景无需真实环境复现、不依赖物理实验、无需投入大量时间与人力成本,即可快速验证。

通过 Pycharm 代码构建蒙特卡洛模型的流程如图 4 所示。

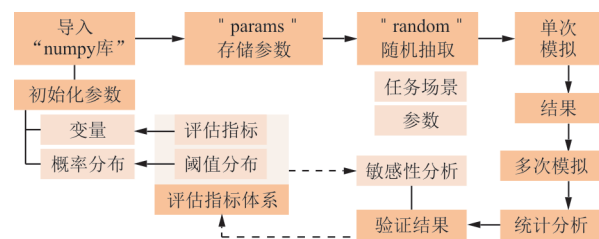


图 4 蒙特卡洛模型构建流程
Fig. 4 Monte Carlo model construction process

主要包括:

1) 明确最小飞行机组验证的建模目标与输出变量,初始化参数字典,基于开放式评估指标体系及动态裁剪、权重再分配结果,定义评估指标,并量化权重。

2) 识别输入参数及概率分布,确定各个评估指标阈值的分布状态,输入其概率分布,定义数值抽取规则。

3) 构建蒙特卡洛模型逻辑关系,将评估指标及权重、阈值分布转化为数学模型。

4) 实现随机采样与迭代计算,随机抽取各个评估指标阈值,即单次最小飞行机组验证模拟参数,给出单次模拟的计算结果;设定迭代规则,进行百万次运算,记录计算结果。

5) 统计分析与结果验证,输出最小飞行机组验证的计算结果,生成可视化直方图,同时也可通过历史数据对比、专家评审、减少变量或假设独立性进行模型验证与调整。

6) 蒙特卡洛模型结果可辅助分析不同评估指标的敏感度,也可迭代完善开放式评估指标体系。

某民用直升机两人制飞行员配置,已应用本文提出的最小飞行机组验证方法开展专项验证工作。验证过程严格遵循评估框架流程,构建蒙特卡洛模型,经模型计算,该型机两人制飞行员配置任务的成功率为 98.55%,平均分 1.001,标准差 0.097,运算结果如图 5 所示。

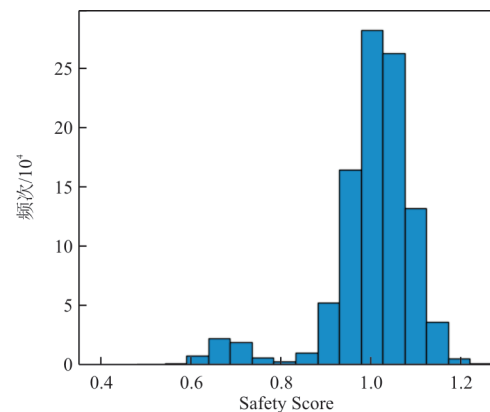


图 5 蒙特卡洛模拟结果
Fig. 5 The results of Monte Carlo simulation

为保证模型计算结果能反映直升机全运行场景下的机组配置特性,对模型的验证结果进行收敛性分析,模拟次数为 1 万次到 100 万次时,均值从 1.012 逐步收敛至 1.001,标准差同步从 0.125

逐步收敛至 0.097,80 万次后均值、方差均达到稳定状态,连续 20 万次无显著波动,具备统计可靠性。综合兼顾验证精度与保守性设计原则,本验证蒙特卡洛模型最终采用 100 万次仿真。

从模拟结果中可以清楚地了解到,100 万次的模拟中,不同得分的次数。其中,成功率 98.55%,代表在所有模拟的飞行任务中,该机组配置能成功执行任务的概率为 98.55%,该成功率需要结合具体判定条件,即在代码逻辑中设定一个 safety score 阈值, safety score 阈值的定义流程如图 6 所示。

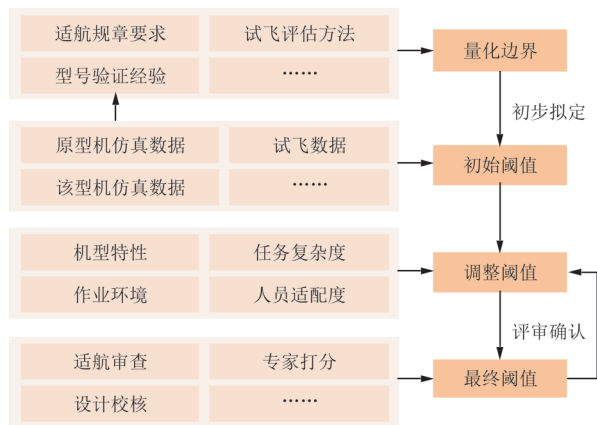


图 6 Safety score 阈值的定义流程

Fig. 6 The definition process of the safety score

1) 提取适航规章中如 CCAR-29.1523 等适航条款的定性要求,结合同类机型验证经验与试飞评估方法,将其转化为量化边界,如评估打分、操作时间、任务完成准确度等。

2) 整合原型机试飞及仿真数据、该型机的仿真数据,拟定 safety score 初始阈值。

3) 结合直升机机型特性、试飞任务复杂度、作业环境条件及人员适配度等调整阈值。

4) 采用德尔菲法等校准阈值,融合适航审查专家、飞行员、人为因素工程师的多方意见进行阈值校准,确定最终 safety score 阈值,后续可结合试飞数据交叉验证。

本文提取 CCAR-29.1523 等适航条款中“机组无过度疲劳、安全完成飞行任务”的定性要求,结合航空人为因素验证常用的 NASA-TLX 认知负荷量表法,整合原型机试飞、仿真数据,考虑试飞科目及条件,通过人为因素工程师分析,适航专家、飞行员评审,最终拟定 safety score 阈值为 0.8。一般评估方法满分 100 时,将 80 分作为可接受负

荷的上限,同时在人机工程学中,当工作负荷达到 80% 能力极限时,人的工作绩效开始下降,80% 被视为实际工作负荷的最高安全值,因此,设定 safety score > 0.8 表示任务在安全或效率标准下成功是合理的,既保障了适航要求的安全冗余,又兼顾了任务执行效能。

模拟结果中平均分 1.001,标准差 0.097,代表所有模拟飞行的平均得分 1.001,反映整体表现水平,表明大多数情况下任务能安全完成,结合成功率 98.55%,说明该机组配置基本能成功执行任务;同时,标准差 0.097 表明数据分布的离散性,说明得分的波动程度小,大多数得分集中在平均值附近,即大部分飞行任务表现稳定。

同时,该项目试飞验证过程中,筛选并适配了 16 类核心验证场景,具体如表 3 所示。

表 3 验证场景
Table 3 Verification scenario

序号	类型	场景
1	正常运行(6)	起飞、悬停、爬升、巡航、进近、着陆等
2	系统故障(8)	动力系统失效、液压系统故障、旋翼转速异常、飞控系统故障、滑油系统故障、燃油系统故障、通信系统故障、传动系统故障等
3	极端环境(2)	大雨飞行、大雪飞行等

邀请 24 名专家对评估指标进行评估打分,包括 6 名试飞员、10 名飞行员、8 名试飞工程师,并结合任务完成情况、专家生理状态数据进行修正。专家评估结果按人员、指标、权重计算得分统计,如表 4 所示。

表 4 专家评估结果
Table 4 Expert assessment results

评估指标	分值		
	试飞员	飞行员	试飞工程师
人—人	92.70	94.00	98.70
人—机(硬件)	92.60	93.50	98.50
人—机(软件)	92.65	93.50	98.60
人—环	92.66	93.00	98.50
任务绩效	92.65	93.50	98.50

最终将专家评估结果与蒙特卡洛模型结果 98.55% 对比,偏差率为 3.7%。同时,与同系列原型机的最小机组验证结论相比,核心配置人数一致,在典型场景下的评估得分偏差在 5% 以内。验证结果已纳入该型号的适航取证技术文件,为机

组配置合规性论证提供了关键数据支撑,成功助力其通过民航局适航审查的专项评审,充分证明本文方法不仅具备科学的理论基础,更拥有成熟的工程应用能力。

相较于传统验证方法,本文方法的先进性进一步凸显,其动态场景适配能力解决了固定场景评估的局限性,可随机模拟不同运行环境,并通过大数据覆盖验证边界;设计前端快速预验证功能极大缩短验证周期,大幅降低了迭代验证成本,为型号设计优化提供了早期数据反馈。上述工程实践充分佐证,本文所提方法兼具正确性、可行性与先进性,能够有效满足民用飞机最小飞行机组适航验证的需求。

6 结 论

1) 最小飞行机组验证的核心在于“场景、负荷、配置”等因素的动态匹配,传统静态化、单一化的验证模式已无法适配现代民用飞机复杂的运行需求,动态验证方法是能够确保验证全面性与针对性的基础,其演化规则需与适航规章要求及机型设计特性深度绑定。

2) 基于算法的动态验证模型具备实时预测与适配能力,能够有效应对飞行过程中动态变化,其输出的最小机组配置结论与试飞数据、多阶段综合评定结果及原型机验证结论的一致性,证明了该类模型在工程应用中的可行性,为解决“动态场景评估”这一行业痛点提供了有效路径。

3) 适用于设计前端的快速预验证工具能够打破“设计—验证”脱节的壁垒,大幅缩短验证周期、降低验证成本,同时为机型驾驶舱布局优化、设备配置调整提供早期技术反馈,符合现代民用飞机“正向设计、同步验证”的发展趋势,具备推广应用价值。

综上,本文提出的基于蒙特卡洛模型的直升机最小飞行机组动态验证方法,解决了传统验证中场景覆盖不全、评估主观性强、验证效率低等问题,其工程应用成效与数据一致性充分证明了方法的正确性、可行性与先进性,可为同类民用飞机型号的最小飞行机组适航取证提供参考,同时为适航审定机构完善相关审查标准提供理论与实践支撑,推动航空人为因素验证向精细化、量化、动态化方向发展。

参 考 文 献

- [1] 蒋晓东. 大型民机最小机组评估初步研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
JIANG Xiaodong. Preliminary research on assessment of minimum flight crew of large civil aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [2] 王黎静, 袁修干. 飞机座舱设计人机工效评价探讨[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(2): 64-66.
WANG Lijing, YUAN Xiugan. Probe into the ergonomic evaluation of cockpit design [J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(2): 64-66. (in Chinese)
- [3] FAA. Airworthiness standards: transport category airplanes: 14 CFR Part 25[S]. US: FAA, 2023.
- [4] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [5] 蒋晓东, 顾宏斌, 吴东苏. 基于虚拟仿真的民机最小机组评估初步研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(2): 88-90.
JIANG Xiaodong, GU Hongbin, WU Dongsu. Preliminary research on assessment of minimum flight crew based on virtual simulation [J]. Digital Technology and Application, 2018, 36(2): 88-90. (in Chinese)
- [6] 中国民用航空局. 运输类旋翼航空器适航规定: CCAR-29-R2[S]. 北京: 中国民用航空局, 2019.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness regulations for transport rotorcraft: CCAR-29-R2 [S]. Beijing: CAAC, 2019. (in Chinese)
- [7] 李昕, 柴郁琳, 王健, 等. 民用直升机最小飞行机组适航验证技术研究[C]// 第十九届中国航空测控技术年会论文集. 西安: 中国航空工业技术装备工程协会, 2022: 353-357.
LI Xin, CHAI Yulin, WANG Jian, et al. Research on airworthiness verification technology of minimum flight crew of civil helicopter [C]// Proceedings of the 19th China Aerospace Measurement and Control Technology Annual Conference. Xi'an: China Aviation Industries Technology Equipment Engineering Association, 2022: 353-357. (in Chinese)
- [8] OKINE E A, ZAREI E, ROGGOW B J, et al. Evolution of human factors research in aviation safety: a systematic review and bibliometric analysis of the intellectual structure [J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2026, 7(1): 100249.
- [9] MALIK A, GOLLNICK V. Impact of reduced crew operations on airlines—operational challenges and cost benefits [C]// 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Washington, D. C.: AIAA, 2016: 3303-3316.

- [10] FAA. Minimum flight crew determination methodology: AC 25.1523-1[S]. US: FAA, 2017.
- [11] EASA. Rotorcraft certification specifications: CS-29 [S]. Cologne, Germany: EASA, 2019.
- [12] SMITH J, BROWN K. Human factors validation for minimum flight crew using HTA and NASA-TLX [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 82: 456-463.
- [13] JONES R, MILLER S. Dynamic task load prediction model for minimum crew configuration assessment [J]. *Journal of Aircraft*, 2020, 57 (3): 987-995.
- [14] MARIA V, BURNHAM C. The economic and safety impacts of reducing flight crew size [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2016, 54: 89-98.
- [15] 刘树强. 民机驾驶舱最小机组工作量评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- LIU Shuqiang. Research on assessment method of Min crew workload application to civil aircraft cockpit [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [16] 刘昌昌. 小型通用飞机最小机组适航符合性方法研究[J]. *中国高新区*, 2018(12): 38, 62.
- LIU Changchang. Research on airworthiness compliance method of minimum unit of small general aircraft [J]. *Science & Technology Industry Parks*, 2018(12): 38, 62. (in Chinese)
- [17] 徐敏敏, 揭裕文. 面向适航审定的飞行场景研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2014(2): 66-69, 83.
- XU Minmin, JIE Yuwen. Research of airworthiness certification oriented scenario [J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2014(2): 66-69, 83. (in Chinese)
- [18] 中国航空综合技术研究所. 装备人机工程要求指标的选择与确定(第4部分)——空中装备: GJB 10797.4[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2022.
- China Aero Polytechnical Establishment. Selection and determination of equipment human engineering requirements (Part 4) —Air equipment: GJB 10797.4 [S]. Beijing: CAPE, 2022. (in Chinese)
- [19] 朱海云. 民用飞机最小机组工作量评价方法研究[J]. *内燃机与配件*, 2019(8): 185-187.
- ZHU Haiyun. Research on evaluation method of minimum crew workload of civil aircraft [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2019(8): 185-187. (in Chinese)
- [20] 王佳杰, 金时曦. 民用飞机最小机组工作量要求及符合性验证研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2025, 54(3): 90-92.
- WANG Jiajie, JIN Shiyu. Research on the minimum flight crew workload requirements and means of compliance for civil aircraft [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2025, 54(3): 90-92. (in Chinese)
- [21] WEGNER F J, RIEDEL E K. Logarithmic corrections to the molecular-field behavior of critical and tricritical systems [J]. *Physical Review B*, 1973, 7(1): 248-256.

(编辑:马文静)