

基于系统安全的低空装备适航技术及标准研究

丁水汀¹, 蔡 蕾^{2a}, 李 果^{2b}, 邱 天^{2a}, 李大庆¹

(1. 中国民航大学, 天津 300300; 2. 北京航空航天大学 a. 航空发动机研究院; b. 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘要: 随着低空领域新场景、新技术的不断涌现, 以往传统构型航空器适航标准的经验作用显著减弱, 亟须建立适应未来低空航空器发展需求的适航标准体系。本文系统梳理了国内外低空装备适航标准的发展现状和未来趋势, 详细分析了航空领域安全技术的演变历程和当前形势。在此基础上, 本文提出了具备“系统安全统领”“对象类型无关”“基于安全效果的规章”和“多种符合性路径”特征的低空装备适航标准体系新架构。该架构有助于应对低空新场景、新技术及其复杂多样性和快速演进性等问题, 为低空装备适航标准体系建设给出了指导框架建议, 也有力支撑了下一代国际适航标准的中国方案实施。

关键词: 低空装备; 适航技术; 适航标准; 系统安全; 标准体系架构

中图分类号: V216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2025)05-0001-15

Research on airworthiness technology and standards for low-altitude equipment based on system safety

DING Shuiting¹, QI Lei^{2a}, LI Guo^{2b}, QIU Tian^{2a}, LI Daqing¹

(1. CAUC, Tianjin 300300, China; 2a. Research Institute of Aero-Engine; 2b. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: With the continuous emergence of new scenarios and technologies in the low-altitude field, the effectiveness of previous experience with airworthiness standards for traditional aircraft configuration has significantly diminished. Thus, it is urgent to establish an airworthiness standard system that meets the development needs of low altitude aircraft in the future. This paper systematically reviewed the current status and future trends of airworthiness standards for low-altitude equipment both domestically and internationally, and detailedly analyzed the development history and current situation of safety technologies in the aviation field. On this basis, a new airworthiness standard system framework for low-altitude equipment was proposed, with features of system safety leadership, object type independence, safety effect-based regulations, and multiple compliance pathways. This framework helps to address issues such as low-altitude new scenarios, new technologies, their complexity, diversity, and rapid evolution. It provides guidance and framework suggestions for the construction of low-altitude equipment airworthiness standard system, and offers strong support for implementing China's approach to next-generation international airworthiness standards.

Key words: low-altitude equipment; airworthiness technology; airworthiness standards; system safety; standard system framework

低空经济是当前全球竞相布局的战略性新兴产业之一。2021年《国家综合立体交通网规划纲要》首次提出发展低空经济^[1], 2024年低空经济作为重点任务被写入政府工作报告^[2], 同年,《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》中明确部署了发展低空经济的具体实施方案^[3]。为贯彻落实国家战略部署, 中国民用航空局《“十四五”民用航空发

展规划》将低空经济列为重点任务^[4], 并成立通用航空和低空经济工作领导小组, 专门负责起草并组织实施低空民用航空发展规划, 拟定民用低空飞行航空器适航审定有关政策标准等^[5]。

低空装备按照技术演进与功能特性可分为传统通用航空器(固定翼飞机、直升机等)和新型低空航空器, 例如无人机、电动垂直起降(eVTOL, electric verti-

cal take-off and landing)航空器等2类^[6]。随着低空领域新场景、新技术的不断涌现,以往传统构型航空器适航标准的经验作用显著减弱,亟须建立适应未来低空航空器发展需求的适航标准体系。

相比于传统民用航空,低空经济的应用场景更加复杂,具有颠覆性、智能性、多样性和演进性等特征。中国航空学会发布的《2024低空经济场景白皮书》中定义了257个单元的低空经济场景矩阵^[6],其中城市空中交通(UAM, urban air mobility)是未来低空经济最典型的应用场景之一,代表着最复杂的先进空中交通(AAM, advanced air mobility)概念^[7]。美国国家航空航天局(NASA, National Aeronautics and Space Administration)报告预测,在场景不受限的情况下,UAM的潜在出行需求可达到每天1100万次^[8]。新的应用场景必将带来新的需求捕获、构型重构、技术创新,更带来潜在的未知风险,新的验证方法与验证设施也会应运而生,这意味着传统适航标准的前提假设对于低空装备已不适用,需要被重新定义。

传统构型航空器经历长期以来的系列化发展,在事故案例的经验教训总结等因素驱动下,其适航规章已发展得较为成熟,对风险的识别已相对充分。然而,低空领域新应用场景的需求引发了一系列航空技术的创新,包括新型低空航空器设计,如无人机、eVTOL等,以及相应的新型动力系统设计,如新能源动力、分布式推进等。除此之外,未来UAM场景还将包括广泛的跨领域新技术,如通信、导航、监视、空管、数字技术和人工智能等^[9-12]。新技术的引入必将带来新的潜在风险,现有的传统构型航空器适航规章制定规则和框架显然难以识别这些新技术带来的潜在风险。

低空航空器适航标准的博弈也日益激烈,欧美国家持续投入,已先后出台UAM运行概念2.0方案^[13]、U-space运行概念4.0方案^[14]等规划文件。美国联邦航空管理局(FAA, Federal Aviation Administration)还发布氢动力航空器安全与审定路线图,明确航空氢燃料动力安全性与适航审定规划布局^[15]。美国、加拿大、英国、澳大利亚和新西兰5国民航局联合成立国家航空管理局(NAA, National Aviation Authorities)联盟,并发布AAM航空器型号审定路线图1.0版^[16],以最大限度实现NAA联盟内型号审定互认。“十四五”期间,中国在低空航空器适航领域也迈出了一大步。亿航智能EH216-S成为全球首款同时取得型号合格证、生产许可证和标准适航证的载人eVTOL航空器,其相关运营人(亿航通航和合翼航空)已取得运营合格证,也标志着亿航智能成为全球首家同时具备“四证”的eVTOL

企业。峰飞航空V2000CG成为全球首款取得型号合格证、生产许可证和特殊适航证“三证”的吨级以上eVTOL航空器。中国自主研发的四座电动飞机RX4E成为全球首款取得型号合格证,符合CCAR-23部的电动飞机。然而,中国目前尚未形成低空经济顶层发展路线图和体系化规章标准。当前国际上也尚未形成成熟、统一的低空航空器适航标准体系,特别是对于新构型航空器,各国适航当局主要按“一事一议”的通用条件或专用条件方式开展适航审定。实践证明,此方式存在效率低下和技术逻辑严谨性不足的问题,难以满足低空领域航空器型号快速发展的需求。

综上所述,亟须开展低空装备适航标准体系建设,通过制定全球统一的顶层规章框架、技术逻辑和多样化、个性化的符合性方法,形成标准化的低空装备适航体系架构。本文系统梳理了国内外低空装备适航标准的发展现状和未来趋势,详细分析了航空领域安全技术演变历程和当前形势。在此基础上,本文提出具备“系统安全统领”“对象类型无关”“基于安全效果的规章”和“多种符合性路径”特征的低空装备适航标准体系新架构,该架构有助于应对低空新场景、新技术及其复杂多样性和快速演进性等问题,为低空装备适航标准体系建设给出了指导框架建议,也有力支撑了下一代国际适航标准的中国方案实施。

1 低空装备适航标准的演进

1.1 传统通用航空器

1.1.1 传统适航标准按航空产品类型划分规章,按专业或符合性方法类别设置章节

美国、欧洲和中国在国际民航组织(ICAO, International Civil Aviation Organization)规则约束下,已分别建立具有世界最广泛影响力的适航标准体系,即FAA的联邦航空规章(FAR, Federal Aviation Regulations)、欧洲航空安全局(EASA, European Union Aviation Safety Agency)的合格审定规范(CS, Certification Specifications)和中国民用航空局(CAAC, Civil Aviation Administration of China)的中国民用航空规章(CCAR, China Civil Aviation Regulations)及其相关解释性文件,如咨询通告、政策声明和审定备忘录等。

传统适航规章主要按照航空产品类型进行划分,其中:航空器适航规章按照专业类别(如飞行、结构/强度要求)和物理对象(如动力装置、设备)进行章节设置;发动机和螺旋桨按照符合性方法类别(如设计与构造、试验)和产品类型(活塞发动机、涡轮发动机)进行章节设置。

1.1.2 传统适航标准采用“打补丁”的串联解耦式制修订模式, 标准迭代周期冗长、响应滞后

传统适航标准的发展历程具有典型的海洋法系特征, 主要通过“打补丁”的方式进行制修订。FAA 持续适航评估报告根据型号设计是否吸取运行事件中识别出的“经验教训”(lessons learned)对民用航空产品进行代际划分^[17-19], 本质上体现了以经验教训(所代表的安全性水平)为核心的“运行实践—标准制修订—设计贯彻—运行实践”的串联解耦式适航标准制修订逻辑链路, 如图 1 所示。首先, 对运行不安全事件进行根本原因分析, 识别出教训; 其次, 对适航规章及其解释性文件进行制定/修订将教训转化为经验; 最后, 通过航空产品的设计贯彻和符合性验证对经验教训加以吸取, 从而确保民用航空产品的适航和安全性。

然而, 这种事后“打补丁”式的串联解耦式制修订模式导致适航标准的迭代周期冗长、响应滞后。以历史上著名的“哈德逊河事件”为例, 经过事故调查、根本原因分析、审定项目实践及政策声明、咨询通告发布, FAA 最终于 2023 年 6 月 5 日发布 FAR-33 部规章第 36 修正案, 新增涡扇发动机核心机吸入群鸟试验要求^[20], 前后历时近 15 年。

1.1.3 适航标准正经历从“规范性要求”向“基于安全效果要求”的过渡和转变

为解决传统规范性适航要求可能对新技术使用造成阻碍的问题, ICAO 提出“基于规范性(prescrip-

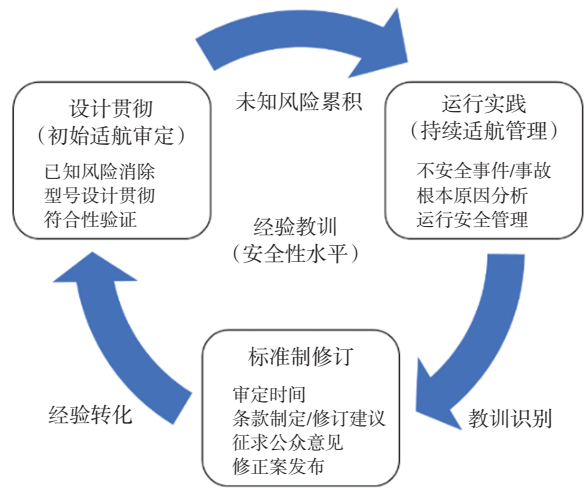


图 1 传统适航标准制修订逻辑链路

Fig.1 Logical link of rulemaking and modification of traditional airworthiness standards

tive-based)的规章要求+可选择的基于安全效果(performance-based)的规章要求”安全监管策略, 推动适航标准逐步向基于安全效果要求为主的方向过渡和转变^[21], 以期实现在确保安全性、提高效率的同时, 更加灵活地适应技术创新。其中规范性规章要求明确提出必须进行哪些符合性工作; 基于安全效果的规章要求则提出必须实现的安全目标, 而不是如何实现该目标。

FAR-23 部正常类飞机适航标准率先进行了基于安全效果的规章编制实践, 如图 2 所示。重组前该规章以规范性要求为主; 重组后该规章采用基于安全效

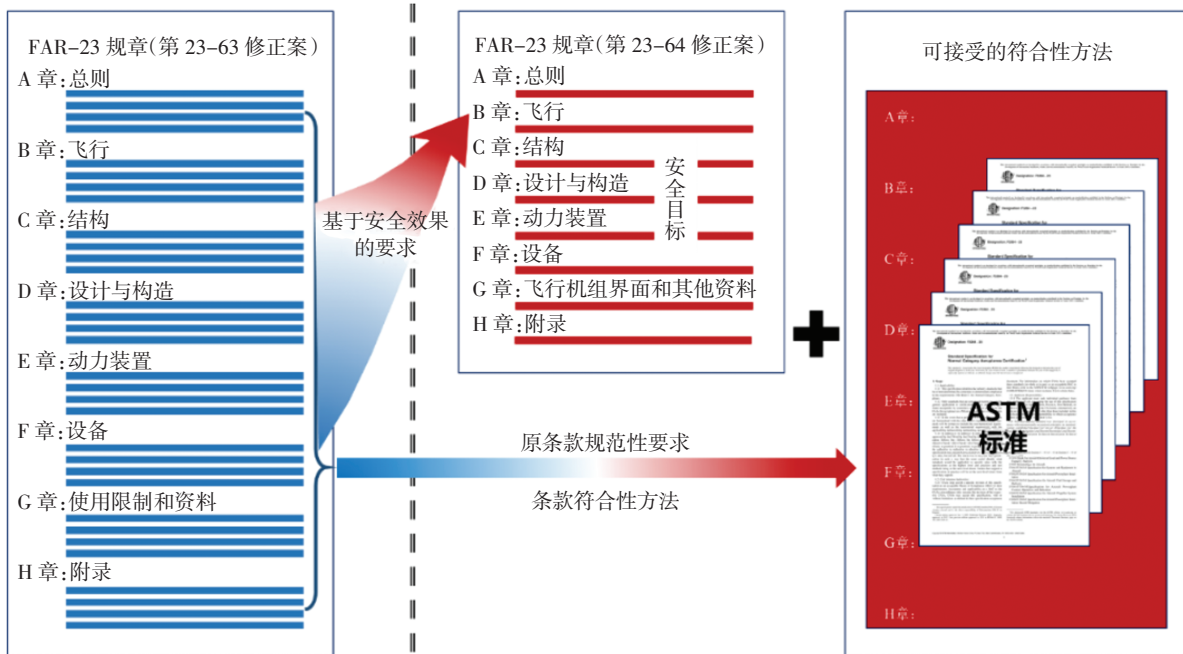


图 2 重组前后 FAR-23 部规章架构的对比

Fig.2 Comparison of FAR-23 regulatory framework before and after reorganization

果的要求。一方面保留原条款中必须强制执行的、基于安全效果的安全目标;另一方面将原条款中规范性要求或符合性方法纳入行业标准,如 ASTM(American Society of Testing Materials)标准,并在条款可接受的符合性方法中加以引用。2017 年 EASA 和 FAA 先后发布重组后的 CS-23 第 5 修正案^[22]、FAR-23 第 23-64 修正案^[23]及其符合性方法指导材料^[24-25]。2022 年 CAAC 发布重组后的 CCAR-23R4^[26]及其咨询通告^[27],编写原则与 FAA 基本相同。

1.1.4 针对小型飞机提出基于风险的“安全统一体”原则,标准迭代周期缩短、响应更及时

为促进新产品和新技术的开发与应用,继“基于安全效果”的规章制定策略之后,ICAO 又针对重量在 750 kg 以下小型飞机的适航规章提出基于风险和比例法的“安全统一体”(safety continuum)原则^[28],着重强调“持续运行安全”“适航标准制定”和“型号合格审定”3 个阶段之间的动态交互关系,如图 3 所示。对比图 1 传统适航标准的制修订逻辑链路可以看出,基于“安全统一体”的标准制修订逻辑链路具有耦合性强、动态发展的特征,使得引进新技术后的适航标准迭代周期缩短、响应更及时。

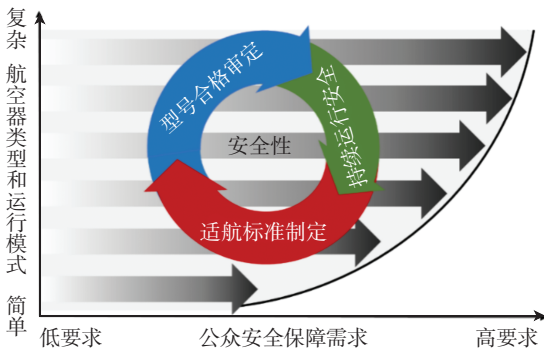


图 3 “安全统一体”的基本概念

Fig.3 Basic concept of safety continuum

“安全统一体”原则根据不同产品类型和运行模式所确定的风险等级及可接受的安全性水平调整设计标准和制定相应的符合性方法;同时进行资源分配,确定适航当局在型号审定中的参与程度和授权范围,从而建立风险与安全收益之间的平衡,最大限度地发挥新技术的安全效益。当采用过于严苛的安全计划时(图 4 右侧部分),型号审定负担和相关风险可能会妨碍安全改进新技术的应用,从而对潜在安全效益转化为实际效果构成障碍,导致总体风险增大;反之,如果安全计划不完善(图 4 左侧部分),同样也会降低安全性水平,导致总体风险增大。因此,应用“安全统

一体”原则的方法需要根据风险水平成比例地制定型号审定安全计划,采用适当的标准以及相应的符合性方法,最终使得总体风险为最小(图 4 中间部分)。

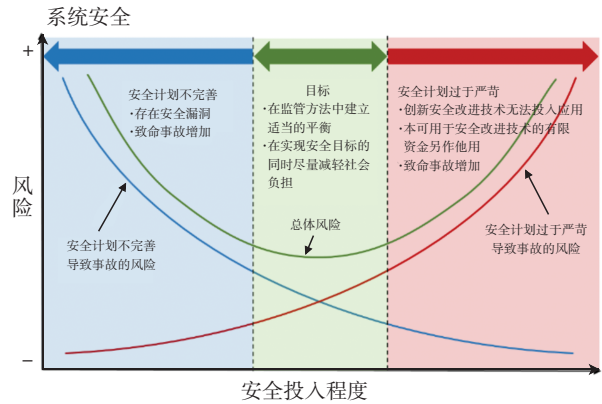


图 4 “安全统一体”应用案例示意图

Fig.4 Schematic diagram of application cases of the safety continuum

1.2 新型低空航空器

1.2.1 无人机适航标准

(1)ICAO 针对无人机的管理主要包括基于风险的方法和基于安全效果的规章 2 个要素^[29]。基于风险的方法重点聚焦无人机对地面人员、财产的伤害风险,以及与有人驾驶航空器的碰撞风险,评估时需综合考虑航空器大小、运行环境(空域、昼夜)、缓解措施等运行的复杂因素,对航空器的风险等级与取证严苛度进行划分。ICAO 鼓励各国结合规范性要求与灵活性,采用基于安全效果的规章要求,制定符合本国实际的无人机适航规章,此外 ICAO 还强调风险评估需动态化,以应对各类复杂运行场景。

(2)美国 2005 年首次提出对民用无人机开展适航管理^[30]。目前 FAA 主要采取重量与用途相结合的分类管理策略,以最大起飞重量 25 kg 为阈值,根据用途逐渐加大对无人机的管理力度。针对最大起飞重量小于 25 kg 的无人机的总体管理思路以运行限制为主,不再进行适航要求。根据其用途又分为娱乐及非娱乐 2 类,其中娱乐类无人机的运行须满足规章 14 CFR Part 101 的 E 章,非娱乐类的无人机须满足针对小型无人机系统的 14 CFR Part 107-2 规章^[31]。针对最大起飞重量超过 25 kg 的无人机根据其用途分为试验类、限用类和大型类。试验类无人机须向 FAA 申请试验类特殊适航证,FAA 依据指令文件 Order 8130.34D^[32]对该类无人机进行适航检查。限用类和大型类无人机按照有人驾驶航空器的方法进行适航管理,其设计方面的技术规章依据 14 CFR Part 21 中的 21.17(b)款^[33],对已有技术规章进行裁剪和外加专用条件。

(3) 欧洲自 2002 年开始民用无人机政策和规章制定研究。欧洲的无人机适航管理主要经历了依据重量分类独立管理和依据风险效果分类统一管理 2 个阶段^[34]。2008 年欧盟发布第 216/2008 号规章, 以最大起飞重量 150 kg 为阈值, 将无人机划分为 EASA 管辖 (> 150 kg) 与成员国自主管理 (≤ 150 kg) 2 类^[35]。2009 年 EASA 发布《无人机驾驶航空器系统适航审定政策说明》(E.Y013-01)^[36], 依据无人机对地撞击能量裁剪现有适航规章对大型无人机实施管理。2013 年欧盟发布欧洲航空系统整合民用 RPAS 路线图, 在 E.Y013-01 政策文件基础上进一步结合国际无人机管理的最新认知和行业发展动态, 首次提出“U-Space”监管框架概念, 奠定了欧盟后续无人机法规分类管理的基础^[37]。2015 年欧盟提出基于运行风险和安全效果, 从整个欧盟层面统一管理无人机分类原则和监管框架。随后, EASA 于 2015 年发布关于引入无人机运行监管框架的预备立法通告, 采用基于风险和基于安全效果的方法, 将无人机分为开放类(低风险)、特殊类(中风险)和审定类(高风险)3 种类型^[38]。2019 年欧盟进一步发布第 2019/945 号委任规章和第 2019/947 号实施规章, 采用基于安全效果的规章编制, 针对 3 种不同类型的无人机分别给出具体的运行管理要求^[39-40]。EASA 随即发布可接受的符合性方法和指南^[41-42], 并持续进行修订改版。

(4) 中国自 2009 年开始逐步构建无人机适航管理体系。中国的无人机适航管理主要经历了单一许可和风险分级 2 个阶段。单一许可阶段以“特许飞行证+临时国籍登记”为核心, 仅要求实名登记, 未建立系统适航标准。2009 年, CAAC 发布《关于民用无人机管理有关问题的暂行规定》^[43], 规定任何民用无人机在飞行前须向地区管理局申请特许飞行证, 同时向其申请办理临时登记。随后, CAAC 又发布《民用无人驾驶航空器实名制登记管理规定》^[44], 要求最大起飞重量大于 0.25 kg 的无人机进行实名登记。在风险分级阶段, CAAC 航空器适航审定司发布《基于运行风险的民用无人机适航审定指导意见》, 明确了基于运行风险的民用无人机适航管理模式, 针对无人机运行场景丰富、运行风险多样的特点, 建立运行风险评估方法, 合理划分风险等级, 开展分级管理^[45]。CAAC 航空器适航审定司随后陆续推出《高风险货运固定翼无人机系统适航标准(试行)》《中高风险无人直升机系统适航标准(试行)》^[46-47], 并发布了《民用无人驾驶航空器系统适航审定分级分类和系统安全性分析指南》咨询通告,

提出须根据民用无人驾驶航空器系统的不同运行场景, 确定可接受的安全性水平, 并划分其运行风险等级^[48]。

1.2.2 eVTOL 适航标准

(1) ICAO 尚未针对 eVTOL 制定统一的规则。全球适航当局主要通过“一事一议”的方式自行制定 eVTOL 适航要求。标准的分散化容易导致国际适航互认障碍, 进一步凸显了建立国际兼容适航标准的必要性和紧迫性。为此, 许多国家的适航当局提交了有关提案, 建议 ICAO 带领全球进行协调, 加快推动 eVTOL 航空器的标准化, 解决 eVTOL 适航审定和运行方面的问题^[49-51]。

(2) FAA 最初按“一事一议”的政策开展适航审定, 针对不同构型 eVTOL 航空器制定适航标准和专用条件, 如 Joby JAS4-1 型和 Archer M001 型飞行器的适航标准^[52-53], 以及 magni350 和 magni650 型电推进系统的专用条件^[54]。现阶段 FAA 的审定策略发生了变化, 新增了动力提升(power-lift)和特种旋翼机 2 种类别航空器的审定要求。针对动力提升航空器, FAA 在传统通用航空器之外, 专门定义了一种特殊类别航空器——动力提升航空器^[55]。2024 年 FAA 提出咨询通告和政策声明草案^[56-57], 针对最大起飞重量 12 500 lb (1 lb = 0.454 kg) 及以下、最大客座数 6 座及以下、以电池为动力的电动发动机推进动力提升航空器, 提供了审定指导, 其中咨询通告 AC 21.17-4 已经于 2025 年 7 月 18 日正式发布^[58]。FAA 在政策声明草案中应用了 ICAO 的“安全统一体”原则, 针对动力提升航空器, 基于复杂程度与运行场景动态调整安全目标及相应的审定等级, 同时还逐步转向“基于安全效果”的规章制定。针对特种旋翼机, 除了动力提升航空器, FAA 还专门定义了一种特殊类别旋翼机, 该类旋翼机具有 2 个以上主旋翼系统、电动或混动推进系统、先进的电传飞控系统 etc 新颖独特的设计特征。2024 年 FAA 发布政策声明草案, 提供了特种旋翼机审定基础和审定流程的指导^[59]。

(3) 与 FAA 不同, EASA 建立了全新的监管框架, 按照垂直起降航空器(VCA, VTOL-capable aircraft)类别开展适航审定。2019 年 7 月, EASA 首先发布了第 1 版《小型垂直起降航空器专用条件》(SC-VTOL-01)^[60], 将 VCA 分类为基础型和增强型 2 类, 其中要求更严苛的增强型用于人口稠密地区及商业载人。为详细解释 SC-VTOL-01 中设定的安全性目标, 2021 年 5 月, EASA 进一步发布第 1 版《建议的垂直起降航空器专

用条件符合性方法》(MOC SC-VTOL)^[61]。随后,EASA持续地对专用条件和符合性方法进行研究和更新,陆续发布了更新后的专用条件符合性方法^[62-64]和第2版《小型垂直起降航空器专用条件》(SC-VTOL-02)^[65]。为补充专用条件 SC-VTOL-02 缺少的电动垂直起降航空器动力装置审定要求,EASA 于 2021 年 4 月发布了电动和混动推进系统专用条件 SC E-19^[66]。

(4)目前 CAAC 主要根据不同机型的具体设计和预期用途,通过“一事一议”的方式,按有人驾驶和无人驾驶 2 种类别分别进行审定。针对有人驾驶 eVTOL,目前 CAAC 将其归类为“特殊类别航空器”,按照“一事一议”的审定原则开展适航审定,与 FAA 第一阶段适航审定策略相似。专用条件主要结合 CCAR 第 23、27、29、33 和 35 部中的部分适航要求,以及其他为确保达到等效的安全性水平而确定的适航要求。目前 CAAC 已发布《沃飞 AE200-100 型电动垂直起降航空器专用条件(征求意见稿)》^[67]。

无人驾驶 eVTOL 参照无人机适航框架,以运行风险评估为核心。CAAC 在 2022 年发布《城市场景物流电动多旋翼无人驾驶航空器(轻小型)系统技术要求》行业标准^[68],对特定场景的 eVTOL 机型给出了更规范的技术要求。目前 CAAC 已发布 2 种无人驾驶 eVTOL 航空器专用条件,即《亿航 EH216-S 型无人驾驶航空器系统专用条件》^[69]和《V2000CG 型无人驾驶航空器系统专用条件》^[70]。此外,CAAC 结合 CCAR 第 33 部和 35 部规章、咨询通告以及 ASTM 标准的技术要求,发布了《电推进系统专用条件编制指南》(AC-21-AA-2024-20)^[71],为具体型号专用条件编制提供技术指导,该方式实质上与 EASA 的通用专用条件类似。

2 航空安全技术的演进

2.1 航空安全的演变历程

全球民用航空安全的演变历程可划分为 4 代^[72]:
①装备因素时代,最初人们确定安全缺陷时主要与装备技术故障有关,安全工作重点在调查和改进装备技术(如航空器本身);20 世纪 50 年代,装备技术的进步导致事故率逐渐下降,安全工作范畴扩大到规章符合性和监督方面;
②人为因素时代,由于重大技术的进步和安全规章的加强,航空事故率显著下降,安全工作的重点扩大到人为因素。此时人为因素仅集中于个人,没有充分考虑运行和组织环境。20 世纪 90 年代初,人们认识到个体在一个复杂环境中活动,包括

多种可能影响个体行为的因素;
③组织因素时代,人们开始从系统的角度看待安全性,即同时涵盖组织因素以及人为因素和装备因素,引入“组织事故”的概念,考虑了诸如组织文化和政策对安全风险控制有效性的影响;
④整体系统时代,人们逐渐认识到航空系统的复杂性,以及不同组织在航空安全中发挥的作用,因此,开始考虑整体航空系统这一更广泛的层面。由此可见,随着安全性技术的进步,人们对安全风险因素的认识也在日趋成熟和完善。

2.2 安全分析方法和工具

2.2.1 传统安全分析方法和工具

早期的适航规章并没有显性的安全分析条款,安全性要求主要隐含在一系列设计和试验条款的实质要求背后。随着航空安全性技术不断发展,民用航空适航规章的安全分析要求经历了从无到有、从定性到定量、从单一条款到多个条款的变化过程。伴随着适航规章安全分析条款要求的发展演变,航空领域各类安全性分析方法和工具也应运而生。传统安全分析方法,如故障树分析(FTA, fault tree analysis)^[73]、事件树分析(ETA, event tree analysis)^[74]、失效模式与影响分析(FMEA, failure mode and effects analysis)^[75]、危害与可操作性分析(HAZOP, hazard and operability study)^[76]等,在过去的使用过程中已经发展得相当成熟。这些传统方法主要基于事件链模型,可描述风险事件的概率因果关系,并捕获事故与原因之间的简单线性关系^[77]。由于操作简单、实施难度低和结果生成快等优点,其已在许多安全关键工业领域得到广泛应用^[78]。除此之外,还有其他安全性分析方法,如功能危害性评估(FHA, functional hazard assessment)、关联图分析(DD, dependence diagram)、马尔科夫分析(MA, Markov analysis)、共模分析(CMA, common mode analysis)等,也在航空系统和设备的安全性分析中被广泛使用^[79]。

2.2.2 安全分析新理论和新方法

随着航空领域复杂系统高度集成和耦合特点的与日俱增,一方面传统安全分析主要依赖人工经验,导致分析结果可能存在差异性,分析过程效率较低;另一方面传统安全分析通常滞后于设计,难以实现设计与分析的有机融合和同步进行;更重要的是,传统安全分析无法充分识别现代复杂系统多部件交互与外部干扰等导致的潜在风险因素。因此,新的安全性理论与方法应运而生,如系统理论事故模型和过程(STAMP, system-theoretic accident model and process-

es)模型^[80]。STAMP 模型将复杂系统部件交互列为事故致因因素之一,把安全问题转换为控制问题,将系统安全的重点从防止失效转为实施行为的安全约束。

为了应对复杂系统安全分析面临的挑战,近年来基于模型的安全性分析(MBSA, model based safety analysis)方法成为研究热点。MBSA 方法是一类基于模型的半自动或自动安全分析方法^[81]。采用此方法旨在不仅解释系统在正常运行状态下的行为,同时还解释系统在出现故障时的行为^[82]。在过去 10 年中, MBSA 方法已在多个领域得到广泛应用^[83]。

针对以复杂低空场景为典型代表的下一代民用航空运输系统(CATS, civil aviation transportation system), Li 等^[84]提出了基于体系视角的新航空安全理念——体系安全。体系安全以高安全、高效率的低空航行系统为目标导向,从安全能力、安全逻辑和安全架构 3 方面构建了复杂大规模 CATS 安全工程的指导框架和方法论。低空体系安全包括低空安全控制链的设计、验证和监管三要素,主要涉及基于模型的系统工程(MBSE, model-based systems engineering)驱动的体系设计、数字工程驱动的体系虚拟实验和并行管理驱动的体系运行 3 项关键技术研究。为了加速“安全统一体”的迭代速度,更科学有效地对低空航行体系安全的各个环节进行系统的安全验证,李大庆^[85]还提出了面向低空体系安全的“数字靶场”概念,即一种基于“数字孪生”技术,对真实体系空间中的体系架构、系统设备、业务流程的运行状态及运行环境进行数字建模,并通过智能技术进行体系级别的安全性加速试验,具备大规模体系推演数字孪生能力的大科学装置。基于“数字靶场”技术可量化评估低空安全链的监视及时性、决策准确性和处置可靠性,既可以对现有低空装备的安全水平进行评估,也可以反演提出对新装备进入航行体系的安全水平要求,有效解决传统试验验证成本高、周期长、复用性差及灵活性不足等问题,从而为低空体系安全设计提供支撑。

2.3 安全分析方法和工具的应用

2.3.1 控制系统

早期安全分析方法和工具的研究重点主要针对复杂控制系统。美国汽车工程师协会(SAE, Society of Automotive Engineers)联合各国适航当局、各主要飞机和发动机制造公司,出台了 SAE ARP4754^[86-87]和 SAE ARP4761^[79,88]2 部标准。这 2 部标准及其引用的标准文件,如 RTCA DO-178^[89]和 RTCA DO-254^[90]等,为民用航空产品的高度集成和复杂系统审定要求、开发过程、安全性评估等活动提供了指导。SAE

ARP4754 和 SAE ARP4761 标准的核心思想是按照双“V”系统工程理念开展高度集成和复杂系统的设计与验证,以及与研制活动相匹配的安全性分析与验证。除了复杂控制系统之外, SAE ARP4754 和 SAE ARP4761 标准还适用于航空产品的非复杂系统。

随着航空电子控制系统的进一步发展,其设计和运行环境日益复杂。传统的安全性分析方法难以应对复杂控制系统的高度集成性和耦合性, MBSA 方法被应用于航空领域的应用研究。目前, MBSA 方法主要被应用于飞机的机载系统^[91-92],而在航空发动机上的实际应用相对较少。丁水汀等^[93]深入分析了 MBSA 方法在航空发动机控制系统安全性分析中的具体应用流程和方法。2023 年修订的 SAE ARP4761A 标准中新增了对 MBSA 方法的应用指导。

2.3.2 结构安全

随着系统安全性技术的发展,航空产品结构件也从单纯的结构完整性设计逐渐过渡到考虑复杂环境的系统安全性设计,同时发展了结构安全性分析方法和工具。以航空发动机限寿件为例,其安全性设计方法的发展主要经历了 3 个阶段^[94]:①结构完整性设计阶段,2007 年之前尚无限寿件概念时,针对限寿件概念包含的盘、隔圈等部件的安全性分析主要以结构完整性为目标,先后经历了静强度设计、安全寿命设计、确定性损伤容限设计和概率损伤容限设计方法的迭代过程;②失效安全设计阶段,2007 年 FAR-33 部首次提出限寿件概念,限寿件的失效风险必须满足发动机整机的安全性指标,即不导致危害性后果的失效概率;③系统安全设计阶段,随着未来新一代航空发动机“强瞬态”“强非线性”“强整体”“强耦合”特征凸显,限寿件在整机“四强”环境工作下的安全性需考虑整机的影响,同时限寿件材料、制造和使用全流程不可避免地导致小概率缺陷,因此,限寿件的安全性设计已经向系统安全设计的方向发展。

丁水汀等^[94]聚焦航空发动机限寿件系统安全设计,贯彻 SAE ARP4754 标准中基于全流程管控的系统安全性双“V”流程,形成了基于发动机研制 4 个典型阶段的限寿件安全性设计过程,如图 5 所示,并提出从输入、输出、工具、数据库、流程、判定准则着手的限寿件安全设计技术方法和相关工具;同时也开发了限寿件寿命期失效概率风险评估软件 PLEAS^[95],该软件已成功应用于某型民用发动机的适航取证过程。

2.3.3 整机安全

自 20 世纪 90 年代以来, MBSA 方法得到了工业

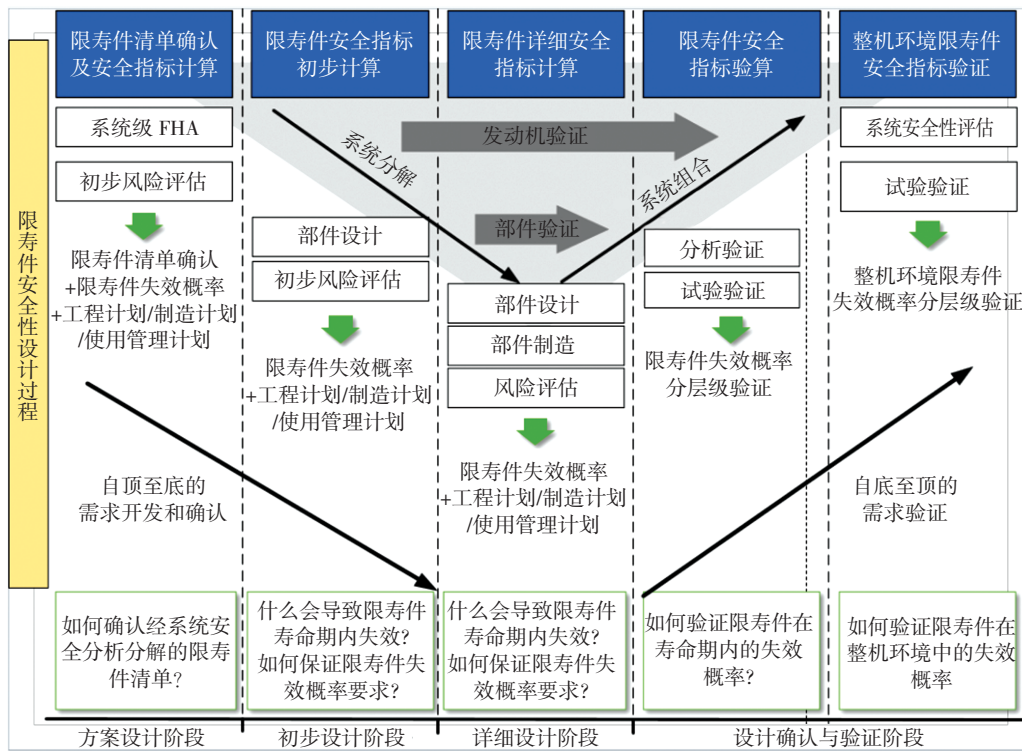


图 5 限寿件安全性设计过程

Fig.5 Safety design processes of life-limited components

界和学术界的广泛关注,在整机层面也开展了大量应用研究,并获得实际应用,例如 Dassult Falcon 7x 和 A380 飞机已使用 MBSA 方法成功地进行安全分析和验证^[96-97]。针对 MBSA 方法在航空发动机上的实际应用,国内学术界开展了一系列应用研究。Li 等^[98]提出了一种面向发动机整机物理系统的 MBSA 方法,以某型通用航空活塞发动机为对象,考虑了故障不确定性及耦合对整机安全性的动态影响,并验证了该方法在设计阶段的有效性和优越性。Ma 等^[99]提出了一种基于多学科航空发动机模型的转子完整性评估方法,将 MBSA 方法应用于某发动机涡轮转子失效评估案例,为表明 CCAR-33-R2 第 33.27 条款的符合性提供了一种有效的方法。李志平等^[100]将系统安全性概念引入到航空发动机气动性能领域,开展了某型航空涡扇发动机基于 MBSA 方法的气动稳定性全局敏感性分析及风险评估。Song 等^[101]提出了一种基于有限状态机网络模型的 MBSA 方法,针对传统安全性方法建模中较多关注物理层面的具体故障模式,从而可能忽视捕捉功能逻辑层面的系统性风险的问题,更好地表征了由部件交互产生的系统状态,且该方法已在某型航空涡扇发动机上进行了初步应用探讨。

2.4 人工智能技术

近年来,人工智能技术迅猛发展。在航空领域,人

工智能已融入设计、生产、运行、维护直至退役的全生命周期各个环节^[102],与之相关的适航当局的审定、规章制定、组织批准和标准化等核心流程以及局方工作人员的能力框架都将受到影响^[103]。人工智能的成功应用,被誉为继 20 世纪 50 年代引入喷气式发动机、20 世纪 80 年代采用飞控系统 2 次重大变革之后,航空领域又一次最具颠覆性的重大变革^[103]。在低空航行领域,为了实现如 NASA 提出的 UAM 成熟度等级 4 的最终目标^[7],将更加严重依赖于人工智能技术^[84]。

人工智能是一种基于机器的系统,这类基于机器学习而非传统方式设计的系统,其运行机制的不可解释性与传统航空业可解释性设计的安全假设形成根本性冲突^[102]。尽管人工智能在提升运行效率、降低人为风险等方面优势显著,但其固有的潜在风险却长期被忽视^[104-105],现有的航空安全管理系统尚未能有效应对人工智能技术带来的重大挑战。

2.4.1 EASA 人工智能发展路线图

为应对航空领域人工智能应用的机遇和挑战,EASA 率先构建了动态演进的发展路线图体系。2020 年 EASA 发布《人工智能路线图 1.0 版》,首次提出“以人为中心”的治理框架,为欧盟航空领域人工智能的应用奠定了基础^[103]。2023 年 EASA 发布《人工智能路线图 2.0 版》,进一步扩展并细化实施路径,提出 5 大

战略目标实施路径和 3 个阶段实施时间表^[106]。伴随着该路线图的出台, 2021 年和 2024 年 EASA 陆续发布该路线图的配套成果, 即与机器学习相关的 3 份研究报告^[107-109], 为人工智能/机器学习在航空安全领域的应用提供了初步指导以及方法和工具建议。2025 年 EASA 再次发布人工智能路线图的配套成果《航空领域人工智能伦理调查报告》^[110]。总体而言, 考虑到人工智能/机器学习在 EASA 职责范围内所有领域的潜在应用, EASA 计划制定适用于欧盟民用航空监管框架的通用人工智能政策, 而非针对特定领域发布分散的指导文件。

2.4.2 FAA 人工智能安全保障体系

FAA 针对航空领域人工智能的应用, 同样采用了“基于安全效果”的规章和“安全统一体”原则。2024 年 FAA 发布《人工智能安全保障路线图 1.0 版》, 提出使用已有的航空安全监管框架作为总的指导原则, 最大程度地将“传统系统安全、人为因素和软件标准”应用于人工智能系统; FAA 同时还提出了人工智能安全

保障 7 项指导原则和 5 项举措^[102]。FAA 的总体思路是从低安全关键性人工智能应用出发, 最终发展到高安全关键性人工智能应用, 陆续制定更详细的人工智能安全保障指导材料。2025 年美国发布第 14307 号行政令, 明确要求自行政令签发之日起 120 天内启动对人工智能工具的相关部署, 协助加快对无人机豁免申请的审查, 以加快无人机系统(UAS, unmanned aerial system)安全融入国家空域系统^[111]。

3 构建低空装备适航体系的新路径

3.1 适航标准体系新特征

尹泽勇等^[112]提出了以“系统安全要求”为统领, “安全等效、逻辑清晰、国际兼容、本土适用”为原则的航空发动机下一代适航规章顶层新架构建议。在此基础上, 本文结合低空装备适航标准和航空安全技术的演进, 如图 6 所示, 分析得到低空装备适航标准体系应具备的特征。

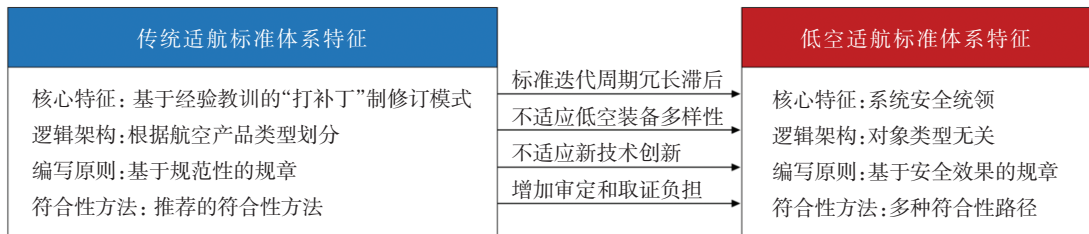


图 6 低空装备适航标准体系应具备的特征

Fig.6 Characteristics of the airworthiness standard system for low-altitude equipment

3.1.1 系统安全统领

传统适航规章遵循的“打补丁”模式迭代周期冗长、响应滞后, 且建立在运行场景相对单一的假设前提下。对于场景复杂多样、技术快速演进的低空装备明显不适应, 因此, 需要建立一种能高效识别复杂系统潜在风险因素的系统安全分析方法, 并应用在适航标准体系中。因此, 基于低空飞行体系安全框架和方法论^[84], 本文提出将“系统安全统领”作为低空装备适航标准体系架构的特征之一, 如图 7 所示。在体系安全框架下, 根据低空复杂运行场景确定低空飞行体系总体安全要求, 同时进行量化分解获得低空装备运行风险等级及其可接受的安全性水平; 在适航标准体系中, 基于分解得到运行风险等级和安全性目标, 通过系统安全分析方法识别出低空装备适航潜在的风险项(包括已知风险和未知风险), 由此解决低空场景复杂多样性带来的问题。

在适航标准体系安全框架下, 通过基于“数字靶场”的数字化审定途径, 形成覆盖模型验证、体系动态推演和持续运行监测的全链路技术方法, 实现更高效率、更低风险的体系安全数智化验证技术。在适航标准体系中, 一方面承接来自体系安全的量化指标牵引; 另一方面将低空装备性能参数及其持续运行监测数据等及时反馈给基于“数字靶场”的体系安全链路, 以支撑测评安全链的监视及时性、决策准确性和处置可靠性, 由此解决低空场景快速演进性带来的问题。根据以上分析, 体系安全框架下的适航标准体系架构, 相比于图 1 传统适航标准制修订逻辑链路, 具有标准迭代周期缩短、响应更及时的特点; 相比于“安全统一体”原则, 由于体系安全、“数字靶场”等新技术的引入, 将进一步显著缩短低空场景下标准的迭代周期, 响应更加及时, 如图 8 所示。

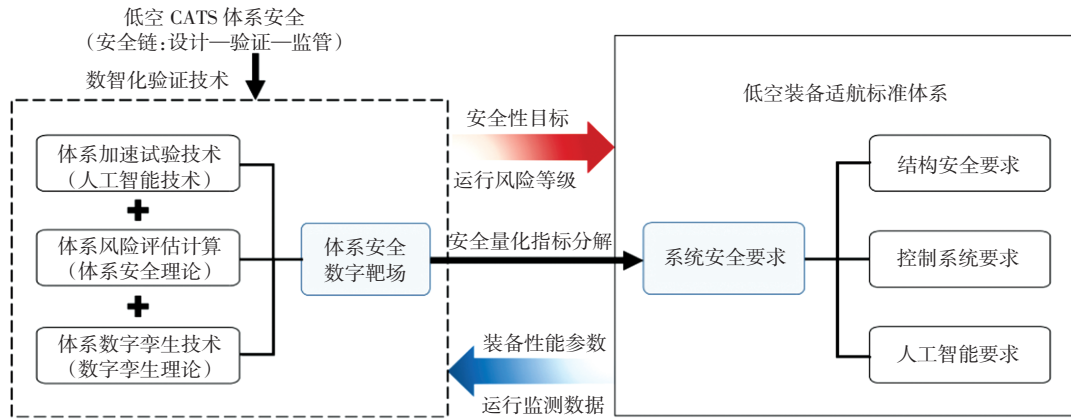


图 7 “系统安全统领”示意图

Fig.7 Schematic diagram of system safety leadership

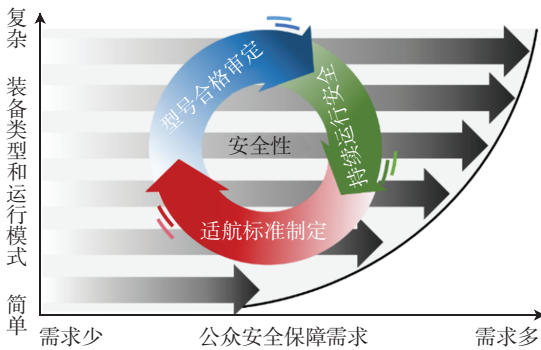


图 8 低空装备适航标准制修订逻辑链路

Fig.8 Logical link of rulemaking and modification of airworthiness standards of low-altitude equipment

3.1.2 对象类型无关

在传统适航规章体系下,低空航空器类型主要包括固定翼飞机、旋翼机等,其动力系统主要分为活塞发动机和涡轮发动机 2 大类。随着各类新兴航空技术的不断涌现,低空航空器及其动力系统类型呈现出短时期内多样化发展的态势。无人机、eVTOL、飞行汽车等新型低空航空器以及电推进、混合推进、氢动力、分布式等新型动力系统的出现,均对适航规章标准制定和适航审定能力提出了巨大挑战。按照航空器、发动机类型进行划分的传统适航规章体系存在适航规章制修订串联式、周期长等缺点,制约了低空航空器的高质量快速发展。因此,本文将“对象类型无关”作为低空装备适航标准体系架构的特征之一(如图 7 所示)。该架构以基于体系安全的(整机)系统安全要求为牵引,以不同运行场景和技术特征下的运行风险等级和安全性目标为区分原则,分别从(限寿件)结构安全要求、控制系统要求、人工智能要求 3 个专业方向形成一系列为实现安全目标必须表明的事件。

3.1.3 基于安全效果的规章

传统适航规章主要采用基于规范性的要求,难以

满足当前航空设计技术发展的需求。但在创新频繁、类型多样化的低空航空器型号审定中往往需要通过“等效安全”“豁免/偏离”的形式更改符合性方法或加以限制,增加了不必要的审查负担。因此,遵循 ICAO “基于安全效果”的规章制定策略,在低空装备适航标准体系建设中采取“基于安全效果”的规章编制原则,将“基于安全效果”的要求与规范性要求分开表述。在适航规章条款中给出强制执行“基于安全效果”的适航要求,充分反映条款的实质安全意图;而针对该条款的规范性要求(或符合性方法)通过解释性文件或技术标准等形式纳入低空装备适航标准体系中。

3.1.4 多种符合性路径

传统基于规范性的适航条款明确要求开展哪些符合性工作,以及评估验证结果可接受性的方法。因此,传统适航规章各条款通常采用条款要求及咨询通告中推荐的符合性方法。新架构将在系统安全统领的基础上,增加系统安全分析的符合性表明路径,在确保安全标准不降低的同时提供灵活性。一方面,在系统安全要求牵引下,可通过系统安全分析方法从顶事件发生概率的角度确保其安全性;另一方面,也可参考传统适航规章成熟的符合性方法表明安全性。因此,针对必须表明的事件共有 3 种符合性路径:传统规章的符合性方法(传统路径)、系统安全分析的符合性方法(新路径 1)和以上 2 种方法的结合(新路径 2)。3 种路径在确保同等安全性水平的前提下具有等效性,从而为适应低空领域新技术发展释放自由度。

3.2 构建适航标准体系新架构

以 4 个特征为目标,初步构建了低空装备适航标准体系架构,如图 9 所示。其中:①针对低空装备适航要求,一方面向上承接低空体系安全框架下新场景和新技术特征等系统安全要求中必须考虑的因素,通过

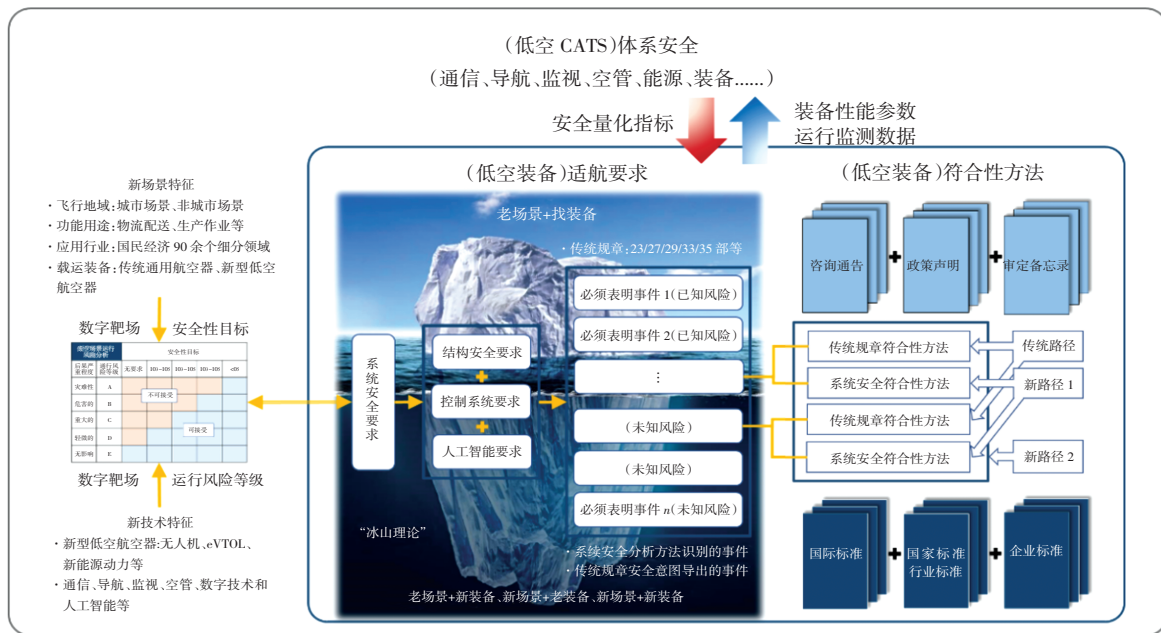


图 9 低空装备适航标准体系架构建议

Fig.9 Suggestions on the architecture of airworthiness standard system for low-altitude equipment

基于“数字靶场”的体系设计及验证分析确定低空装备运行风险等级及其可接受的安全性水平;另一方面通过系统安全分析识别结构安全、控制系统和人工智能 3 个方向的已知和未知风险项,并向下形成基于安全效果的必须表明的事件(部分已知风险项来自传统适航规章要求);②针对每一个必须表明的事件,进一步形成低空装备符合性方法,包括上述 3 条符合性路径(其中部分符合性方法来自传统规章适航要求中规范性表述部分,以及部分条款解释性文件),符合性方法的内容可以通过局方的咨询通告、政策声明和审定备忘录以及工业方的技术标准的形式给出。

3.3 适航标准体系新技术

低空装备适航标准体系建设主要涉及以下几方面新技术。

3.3.1 复杂系统安全性分析方法和工具库

随着低空装备设计技术的不断创新,系统设计和运行环境日益复杂,传统的安全性分析方法已无法应对低空装备复杂系统的高度集成性和多元性。传统的航空领域安全性分析往往侧重于单一部件的物理故障模式,而忽视系统内部各部件之间复杂的功能交互。针对低空场景复杂多样性的特征,如何全面识别由此带来的潜在风险,尤其是功能间不安全交互导致的涌现性风险,是低空装备复杂系统安全性分析中的关键问题。此外,低空场景快速演进性的特征对适航标准制修订链路提出了周期短、响应及时的要求。因

此,需要基于体系安全框架下的“数字靶场”技术,进一步探索和发展先进的复杂系统安全性分析理论、方法和工具,结合已有的传统安全性分析方法和工具、安全性分析新理论和新方法,逐步形成适应基于风险的复杂系统安全分析工具库。

3.3.2 基于“数字靶场”新设施的人工智能安全技术

EASA 提出航空领域人工智能安全保障的核心在于构建可信、透明、适应性强的技术体系,从而覆盖从算法设计到场景落地全链条。关键技术聚焦于解决数据驱动的学习风险、人机协作瓶颈以及新兴威胁。同时,需通过动态法规和跨域协同确保技术演进与安全、伦理需求同步。其中特别强调,未来 10 年优先发展数据与模型驱动相结合的混合人工智能和实时风险监控能力,以应对航空系统复杂性的指数级增长。FAA 提出航空领域人工智能安全保障技术体系主要包括 3 个维度关键技术:①可解释性增强、形式化验证和对抗性防御,确保人工智能系统符合 DO-178 和 ARP4761 等航空安全标准的验证技术;②基于风险分级和人机协同,实现从辅助系统到核心控制逐步部署的渐进应用架构;③通过实时监控、数据治理和标准协同,形成闭环安全框架的持续保障机制。综合以上关键技术分析,在严格保证安全的前提下释放人工智能技术的潜力,以实现平衡创新速度与民航特有的超高安全要求。体系安全“数字靶场”将成为低空飞行复杂体系下验证可信人工智能的新设施。

3.3.3 安全意图挖掘及转化技术

在已有民用航空产品适航取证项目的推动下,大量传统适航标准研究和实践经验,对于低空装备的设计与适航取证仍然具有十分重要的借鉴意义。然而,低空新场景、新技术及其复杂多变的特征使得这些传统适航标准经验的作用在逐渐减弱。因此,需要系统深入地挖掘传统适航标准背后更深层次的安全意图及其相应的基础理论和工程问题。在此基础上,进一步转化为低空装备系统安全要求中已知风险部分必须表明的事件,形成安全意图转化技术。

3.3.4 基于系统安全分析的符合性方法和数据累积机制

结合航空领域安全分析方法和工具的应用,进一步开展基于系统安全分析的适航要求符合性方法研究,形成与传统符合性方法相比安全水平不降低的符合性新路径。同时,为了将低空装备性能参数及其持续运行监测数据及时反馈给基于“数字靶场”的体系安全链路中,以解决低空场景快速演进性的问题,还需开展基于系统安全的低空装备持续运行数据累积和反馈机制研究,分析低空装备持续运行中安全性相关数据库框架要素,建立健全低空场景持续运行可靠性数据等的数据库、分析和反馈机制,支撑低空装备安全、高效和可持续发展。

4 结语

传统适航标准主要按航空产品类型、专业或符合性方法类别进行规章划分和章节设置,采用“打补丁”方式进行规章制修订。该模式明显不适应低空新场景、新技术及其复杂多样性、快速演进性的特征,缺乏适应创新的灵活性和时效性。近年来,在ICAO的顶层监管策略推动下,传统适航规章正经历从“规范性要求”向“基于安全效果要求”的过渡和转变;同时,新的“安全统一”原则被提出并在新型低空航空器领域开展应用。

针对以无人机、eVTOL、新型推进系统为代表的新型低空装备,ICAO及主要国家和地区已开展了一系列标准的实践研究,在型号发展与适航认证方面也取得一系列突破。但是,目前尚未形成统一的监管框架和适航标准体系,主要采用的“一事一议”审定方式效率极低且技术逻辑严谨性不足,建立统一的适航标准体系必要且紧迫。

随着民用航空安全从装备因素时代逐渐发展到

整体系统时代,各类传统安全性方法和工具也陆续发展并在航空领域获得成熟应用。为了应对航空领域等复杂系统的发展需求,出现了以MBSA、体系安全为代表的新的安全性理论与方法,并在航空领域的控制系统、结构安全和整机安全方面开展了应用研究,安全性基础理论与方法已实现跨代和进步。同时,欧美还制定并发布了一系列人工智能路线图及配套成果报告,加大力度推进人工智能在航空领域的应用及安全保障技术。

基于低空飞行体系安全总框架,结合前期针对航空发动机下一代适航规章顶层新架构的研究成果,本文进一步提出具有“系统安全统领”“对象类型无关”“基于安全效果的规章”和“多种符合性路径”特征的低空装备适航标准体系架构,并给出了此架构下涉及的4个方面新技术。

此外,建议适航当局联合工业界、学术界及国际合作伙伴,建立“政、产、学、研、用”协同联动机制,系统开展低空装备适航标准体系的制定研究与实践验证,深化适航标准体系建设与低空民航运输系统运行场景的贯通融合,分阶段逐步实现低空装备适航标准体系的建立。未来可进一步将低空领域创新性的适航标准体系建设经验逐步推广到整个民用航空领域,最终形成覆盖全空域、全机型、全寿命周期的智能适航标准体系。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 国家综合立体交通网规划纲要[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(8): 25-37.
- [2] 李强. 政府工作报告—2024年3月5日在第十四届全国人民代表大会第二次会议上[N]. 人民日报, 2024-03-06(3).
- [3] 中共中央. 中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定[M]. 北京: 人民出版社, 2024.
- [4] 中国民用航空局, 国家发展和改革委员会, 交通运输部. “十四五”民用航空发展规划[EB/OL]. (2021-12-14)[2025-09-20]. https://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/FZGH/202201/t20220107_210798.html.
- [5] 中国民用航空局. 关于成立民航局通用航空和低空经济工作领导小组的通知: 民航函[2025]481号[S]. 北京: 中国民用航空局, 2025.
- [6] 中国航空学会. 2024低空经济场景白皮书: v1.0[R]. 北京: 中国航空学会, 2024.
- [7] HILL B P, D E CARME D, METCALFE M, et al. UAM vision concept of operations (ConOps) UAM maturity level (UML) 4 version 1.0: Report No. 20205011091[R]. Washington DC: NASA, 2020.
- [8] GOYAL R, REICHE C, FERNANDO C, et al. Urban air mobility market study[R]. Washington DC: NASA, 2018.
- [9] WANG K, QU X B. Urban aerial mobility: reshaping the future of urban

- transportation[J]. The Innovation, 2023, 4(2): 100392.
- [10] YAN Y P, WANG K, QU X B. Urban air mobility (UAM) and ground transportation integration: a survey[J]. Frontiers of Engineering Management, 2024, 11(4): 734-758.
- [11] KABASHKIN I, MISNEVS B, ZERVINA O. Artificial intelligence in aviation: new professionals for new technologies[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 11660.
- [12] YANG C Y, HUANG C Y. Natural language processing (NLP) in aviation safety: systematic review of research and outlook into the future[J]. Aerospace, 2023, 10(7): 600.
- [13] FAA. Urban air mobility (UAM) concept of operations (ConOps): version 2. 0[R]. Washington DC: FAA, 2023.
- [14] EASA. U-space ConOps and architecture: edition 4.0[R]. Cologne: EASA, 2023.
- [15] FAA. Hydrogen-fueled aircraft safety and certification roadmap[R]. Washington DC: FAA, 2024.
- [16] FAA. Roadmap for advanced air mobility aircraft type certification: edition 1. 0[R]. Washington DC: FAA, 2025.
- [17] FAA. Technical report on propulsion system and auxiliary power unit (APU) related aircraft safety hazards[R]. Washington DC: FAA, 1999.
- [18] FAA. 2nd technical report on propulsion system and auxiliary power unit (APU) related aircraft safety hazards[R]. Washington DC: FAA, 2005.
- [19] FAA. 3rd technical report on propulsion system and auxiliary power unit (APU) related aircraft safety hazards [R]. Washington DC: FAA, 2017.
- [20] FAA. FAR Part 33. 76 amendment 33-36 brid ingestion[S]. Washington DC: FAA, 2023.
- [21] ICAO. Doc 9859 safety management manual: 4th edition[S]. Montreal: ICAO, 2018.
- [22] EASA. CS-23 amendment 5 certification specifications for normal-category aeroplanes[S]. Cologne: EASA, 2017.
- [23] FAA. FAR Part 23 amendment 23-64 airworthiness standards: normal category airplanes[S]. Washington DC: FAA, 2017.
- [24] EASA. Acceptable means of compliance and guidance material to certification specifications for normal-category aeroplanes: issue 1[S]. Cologne: EASA, 2017.
- [25] FAA. FAA accepted means of compliance process for 14 CFR part 23: AC 23. 2010-1[S]. Washington DC: FAA, 2017.
- [26] 中国民用航空局. 正常类飞机适航规定: CCAR-23-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
- [27] 中国民用航空局. 正常类飞机审定: AC-23-AA-2022-01[S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.
- [28] ICAO. Doc 9760 airworthiness manual: 4th edition[S]. Montreal: ICAO, 2020.
- [29] 国际民航组织. 无人航空器系统规章的制定[EB/OL]. [2025-09-20]. https://www.icao.int/safety/UA/UASToolkit/Pages/Narrative-Regulation_zh.aspx
- [30] MCGRAW J W. Unmanned aircraft systems operations in the U.S. national airspace system-interim operational approval guidance: AFS-400 UAS Policy 05-01[S]. Washington DC: Department of Transportation, FAA, 2005.
- [31] FAA. Small unmanned aircraft systems (sUAS): AC 107-2[S]. Washington DC: FAA, 2016.
- [32] FAA. Airworthiness certification of unmanned aircraft systems and optionally piloted aircraft: Order 8130.34D[S]. Washington DC: FAA, 2017.
- [33] FAA. FAR part 21.17 amendment 21-107 designation of applicable regulations[S]. Washington DC: FAA, 2024.
- [34] 李凯, 陆崑, 丁晓宇, 等. 欧美无人驾驶航空器系统适航管理政策解读及启示[J]. 航空维修与工程, 2018(5): 94-96.
- [35] European Union. Common rules in the field of civil aviation and establishing a European Aviation Safety Agency: Regulation (EC) No. 216/2008[S]. Brussels: European Union, 2008.
- [36] EASA. Policy statement airworthiness certification of unmanned aircraft systems (UAS): E.Y013-01[S]. Cologne: EASA, 2009.
- [37] European Commission. Roadmap for the integration of civil remotely-piloted aircraft systems into the European aviation system[R]. Brussels: European Commission, 2013.
- [38] EASA. Introduction of a regulatory framework for the operation of drones: A-NPA 2015-10[S]. Cologne: EASA, 2015.
- [39] European Union. Commission delegated regulation (EU) on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems: 2019/945[S]. Brussels: European Union, 2019.
- [40] European Union. Commission implementing regulation (EU) on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft: 2019/947 [S]. Brussels: European Union, 2019.
- [41] EASA. Acceptable means of compliance (AMC) and guidance material (GM) to part-UAS: UAS operations in the 'open' and 'specific' categories[S]. Cologne: EASA, 2019.
- [42] EASA. Acceptable means of compliance (AMC) and guidance material (GM) to commission implementing regulation (EU) 2019/947: issue 1[S]. Cologne: EASA, 2019.
- [43] 中国民用航空局航空器适航审定司. 关于民用无人机管理有关问题的暂行规定: ALD2009022[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2009.
- [44] 中国民用航空局航空器适航审定司. 民用无人驾驶航空器实名注册登记管理规定: AP-45-AA-2017-03[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2017.
- [45] 中国民用航空局航空器适航审定司. 基于运行风险的无人机适航审定指导意见: 民航适发[2019]3号[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2019.
- [46] 中国民用航空局航空器适航审定司. 关于发布高风险货运固定翼无人机系统适航标准(试行)的通知: 民航适发[2020]1号[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2020.
- [47] 中国民用航空局航空器适航审定司. 关于发布中高风险无人直升机系统适航标准(试行)的通知: 民航适发[2020]7号[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2020.
- [48] 中国民用航空局航空器适航审定司. 民用无人驾驶航空器系统适航审定分级分类和系统安全性分析指南: AC-21-AA-2022-40[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2022.
- [49] Japan Civil Aviation Bureau. Proposal to ICAO for taking a leadership toward global harmonization on eVTOL[R]. Tokyo: Japan Civil Aviation

- Bureau, 2022.
- [50] Japan Civil Aviation Bureau. Proposal for acceleration of standardization at the ICAO for electric vertical take-off and landing (eVTOL)[R]. Tokyo: Japan Civil Aviation Bureau 2024.
- [51] National Civil Aviation Agency of Brazil. Electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft product certification and operational aspects[R]. Sao Paulo: National Civil Aviation Agency of Brazil, 2024.
- [52] FAA. Airworthiness criteria: special class, airworthiness criteria for the Joby Aero, Inc. Model JAS4-1 Powered-Lift[S]. Washington DC: FAA, 2024.
- [53] FAA. Airworthiness criteria: special class, airworthiness criteria for the Archer Aviation, Inc. Model M001 Powered-Lift[S]. Washington DC: FAA, 2024.
- [54] FAA. Special conditions: magniX USA, Inc., magni350 and magni650 model engines: 33-022-SC[S]. Washington DC: FAA, 2021.
- [55] FAA. FAR Part 1.1 general definitions[S]. Washington DC: FAA, 2025.
- [56] FAA. 4 type certification-powered-lift: Draft AC 21.17[S]. Washington DC: FAA, 2024.
- [57] FAA. Safety continuum for powered-lift: Draft PS-AIR 21.17-01[S]. Washington DC: FAA, 2024.
- [58] FAA. 4 type certification-powered-lift: AC 21.17[S]. Washington DC: FAA, 2025.
- [59] FAA. Special class rotorcraft: Draft PS-AIR 21.17-02[S]. Washington DC: FAA, 2024.
- [60] EASA. Special condition for small-category VTOL aircraft: SC-VTOL-01[S]. Cologne: EASA, 2019.
- [61] EASA. Means of compliance with the special condition VTOL: MOC SC-VTOL[S]. Cologne: EASA, 2021.
- [62] EASA. Means of compliance with the special condition VTOL: MOC-2 SC-VTOL[S]. Cologne: EASA, 2022.
- [63] EASA. Means of compliance with the special condition VTOL: MOC-3 SC-VTOL[S]. Cologne: EASA, 2022.
- [64] EASA. Means of compliance with the special condition VTOL: MOC-4 SC-VTOL[S]. Cologne: EASA, 2023.
- [65] EASA. Special condition for small-category VTOL aircraft: SC-VTOL-02[S]. Cologne: EASA, 2024.
- [66] EASA. Electric/hybrid propulsion system: SC E-19[S]. Cologne: EASA, 2021.
- [67] 中国民用航空局航空器适航审定司. 沃飞 AE200-100 型电动垂直起降航空器专用条件(征求意见稿): SC-21-006[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2023.
- [68] 中国民用航空局航空器适航审定司. 城市市场物流电动多旋翼无人驾驶航空器(轻小型)系统技术要求: MH/T 6126-2022[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2022.
- [69] 中国民用航空局航空器适航审定司. 亿航 EH216-S 型无人驾驶航空器系统专用条件: SC-21-002[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2022.
- [70] 中国民用航空局航空器适航审定司. V2000CG 型无人驾驶航空器系统专用条件: SC-21-004[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2023.
- [71] 中国民用航空局航空器适航审定司. 电推进系统专用条件编制指南: AC-21-AA-2024-20[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2024.
- [72] ICAO. Safety management manual(4th Edition): Doc 9859[S]. Montreal: ICAO, 2018.
- [73] SHALEV D M, TIRAN J. Condition-based fault tree analysis (CBFTA): a new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(9): 1231-1241.
- [74] KAISER B, GRAMLICH C, FÖRSTER M. State/event fault trees: a safety analysis model for software-controlled systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(11): 1521-1537.
- [75] PEETERS J F W, BASTEN R J I, TINGA T. Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 172: 36-44.
- [76] DUNJÓ J, FTHENAKIS V, VÍLCHEZ J A, et al. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1/2/3): 19-32.
- [77] ANTONELLO F, BUONGIORNO J, ZIO E. A methodology to perform dynamic risk assessment using system theory and modeling and simulation: application to nuclear batteries[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 228: 108769.
- [78] LI Y, LIU P D, LI G. An asymmetric cost consensus based failure mode and effect analysis method with personalized risk attitude information [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 235: 109196.
- [79] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment: ARP4761-1996[S]. Washington DC: Society of Automotive Engineers, 1996.
- [80] LEVESON N G. Engineering a safer world: systems thinking applied to safety[M]. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2011.
- [81] SHARVIA S, PAPADOPOULOS Y. Integrating model checking with HiP-HOPS in model-based safety analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 135: 64-80.
- [82] GÓMEZ-ANDRADES A, MUÑOZ P, SERRANO I, et al. Automatic root cause analysis for LTE networks based on unsupervised techniques[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 2369-2386.
- [83] HU Y P, PENG Q B, NI Q, et al. Event-based safety and reliability analysis integration in model-based space mission design[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 229: 108866.
- [84] LI D Q, YAO A Z, FENG K F, et al. Next frontiers of aviation safety: system-of-systems safety[J]. Engineering, 2025, 52: 262-277.
- [85] 李大庆. 基于核心技术 破解低空体系未知风险[EB/OL]. (2024-08-19)[2025-09-10]. <http://education.news.cn/20240819/78a6db48d0b14e17a88901f153f964a9/c.html>.
- [86] SAE. Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems: ARP4754-1996 [S]. Washington DC: SAE, 1996.
- [87] SAE International. Guidelines for development of civil aircraft and systems: ARP-4754-2010 [S]. Washington DC: SAE International, 2010.
- [88] SAE International. Guidelines for conducting the safety assessment process on civil aircraft, systems, and equipment: ARP4761-2023[S]. Wa-

- shington DC: SAE International, 2023.
- [89] RTCA. Software considerations in airborne systems and equipment certification: DO-178C-2011[S]. Washington DC: RTCA, 2011.
- [90] RTCA. Design assurance guidance for airborne electronic hardware: DO-254-2000[S]. Washington DC: RTCA, 2000.
- [91] MHENNI F, CHOLEY J Y, NGUYEN N, et al. Flight control system modeling with SysML to support validation, qualification and certification[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(3): 453-458.
- [92] SIRGABSOU Y, BARON C, PAHUN L, et al. Model-driven engineering to ensure automotive embedded software safety. methodological proposal and case study[J]. Computers in Industry, 2022, 138: 103636.
- [93] 丁水汀, 刘晓锋, 罗晨爽, 等. 航空发动机控制系统适航安全性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2024.
- [94] 丁水汀, 李 果, 周惠敏. 航空发动机限寿件适航的五大问题[M]. 北京: 科学出版社, 2025.
- [95] 丁水汀, 李 果, 邱 天, 等. 航空发动机安全性设计导论[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [96] LISAGOR O, KELLY T, NIU R. Model-based safety assessment: review of the discipline and its challenges[C]//2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, June 12-15, 2011, Guiyang, China. IEEE, 2011: 625-632.
- [97] LI Y, GONG Q, SU D. Model-based safety assessment of aircraft power plant[C]//3rd International Symposium on Aircraft Airworthiness, Toulouse, France, 2013.
- [98] LI G, TENG Y D, WANG Z L, et al. A method for automatic generating safety analysis based on aviation piston engine model[C]//34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Florence, Italy, 2024.
- [99] MA Q L, DING S T, QIU T, et al. A multidisciplinary model-based engine rotor integrity assessment approach derived from system safety requirements[M]// FU S. 2023 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2023) Proceedings. Singapore: Springer, 2016: 1133-1153.
- [100] 李志平, 孙泽琦, 朱星宇, 等. 基于喘振/失速的航空发动机系统安全评估方法[J]. 航空动力学报, 2025, 40(8): 488-499.
- [101] SONG X Y, QI L, LIU S Y, et al. Simple analysis of complex system safety based on finite state machine network and phase space theory[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 249: 110205.
- [102] FAA. Roadmap for artificial intelligence safety assurance: version I[R]. Washington DC: FAA, 2024.
- [103] EASA. Artificial intelligence roadmap 1.0: a human-centric approach to AI in aviation[R]. Cologne: EASA 2020.
- [104] PARK P S, GOLDSTEIN S, O'GARA A, et al. AI deception: a survey of examples, risks, and potential solutions[J]. Patterns, 2024, 5(5): 100988.
- [105] GIUDICI P, CENTURELLI M, TURCHETTA S. Artificial intelligence risk measurement[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 235: 121220.
- [106] EASA. Artificial intelligence roadmap 2.0: human-centric approach to AI in aviation[R]. Cologne: EASA, 2023.
- [107] EASA. EASA Concept paper: first usable guidance for level 1 machine learning applications: a deliverable of the EASA AI roadmap [R]. Cologne: EASA, 2021.
- [108] EASA. EASA Concept paper: guidance for level 1 & 2 machine learning applications: a deliverable of the EASA AI roadmap issue 02[R]. Cologne: EASA, 2024.
- [109] EASA. Machine learning application approval[R]. Cologne: EASA, 2024.
- [110] EASA. Ethics for AI in aviation: aviation professionals survey results 2024/2025[R]. Cologne: EASA, 2025.
- [111] TRUMP D J. Unleashing American drone dominance executive order: 14307[S]. Washington DC: The White House, 2025.
- [112] 尹泽勇, 丁水汀, 李 果, 等. 航空发动机下一代适航规章制度制定策略和技术路径[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 230-239.

(责任编辑: 刘智勇)

《中国民航大学学报》版权声明

本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊全文数据库(CJFD)及万方数据数字化期刊群、维普期刊全文数据库、中国台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)、波兰《哥白尼索引》(IC, Index of Copernicus)、美国剑桥科学文摘社(CSA, Cambridge Science Abstracts)等国内外知名数据库。凡本刊录用的稿件将同时通过互联网进行网络出版或提供信息服务。凡投本刊的稿件一经录用, 本刊即认定作者将该文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在世界范围内转让给本刊。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。