

动力提升航空器适航标准对比研究

——基于FAA、EASA与CAAC体系的分析

牟忆豪 王永铮 张泽宇

中国民用航空飞行学院

DOI:10.32629/etd.v7i1.22238

[摘要] 动力提升航空器对传统适航标准体系提出系统性挑战。本文梳理FAA、EASA与CAAC三大体系下动力提升航空器的规章现状,对比传统CCAR-23/25/27/29部与新型适航标准在理念、条款与审定路径上的核心差异,并从新构型气动性能、新能源动力系统、电传飞控三个维度探讨审查重点。研究表明,三大体系均采用“性能导向+等效安全”理念,但在安全目标、条款颗粒度与运行衔接上各有侧重,为我国适航标准完善提供参考。

[关键词] 动力提升航空器; Powered-Lift; 适航标准; 电动垂直起降

中图分类号: V221 **文献标识码:** A

Comparative Research on Airworthiness Standards for Powered-Lift Aircraft: An Analysis Based on the FAA, EASA, and CAAC Systems

Yihao Mou Yongzheng Wang Zeyu Zhang

Civil Aviation Flight University of China

[Abstract] Powered-lift aircraft pose systematic challenges to traditional airworthiness standards. This paper reviews the current regulatory frameworks for powered-lift aircraft under the three major systems of the FAA, EASA, and CAAC, and compares the key differences in concepts, provisions, and certification pathways between the traditional CCAR-23/25/27/29 regulations and new airworthiness standards. It further examines the key areas of review from three dimensions: aerodynamic performance of new configurations, new-energy propulsion systems, and fly-by-wire flight control systems. The study shows that all three systems adopt the concepts of “performance-based standards” and “equivalent level of safety,” while differing in their emphasis on safety objectives, granularity of regulatory provisions, and integration with operational requirements. These findings provide a reference for improving China’s airworthiness standards.

[Key words] powered-lift aircraft; Powered-Lift; airworthiness standards; electric vertical takeoff and landing (eVTOL)

引言

低空经济蓬勃发展,以电推进、分布式升力/推力和电传飞控为核心的新型垂直起降航空器加速商业化,传统适航标准面临适配困境。动力提升航空器(Powered-Lift)在悬停、过渡与巡航阶段分别表现出多旋翼、直升机与固定翼飞机的混合特征,飞行控制、动力分配与气动响应高度耦合,无法简单套用传统飞机或旋翼航空器适航规章。本文以FAA、EASA、CAAC三大体系为框架,系统对比传统航空器与动力提升航空器适航标准的核心差异,旨在为审定实践与标准体系建设提供参考。

1 适航标准体系概述

1.1 适航与适航标准的基本概念

适航的核心并非证明航空器“绝对安全”,而是证明其在批准的设计、制造、运行和持续适航控制边界内,达到法规要求的可接受安全水平。传统适航标准通常将航空器先划入飞机或旋翼航空器,再按重量、座位数和运行类别适用23部、25部、27部、29部等规章。动力提升航空器的难点在于上述前提不再充分成立——其在起飞、悬停、过渡、巡航和进近阶段分别表现得像不同类别航空器的混合体,适航审查必须回到“在每个飞行形态和失效状态下是否仍能满足批准运行所需的安全结果”这一目标。

1.2 国际主要适航标准体系

当前全球形成了三大并行的适航标准体系:美国FAA体系以《联邦航空条例》(14 CFR)为核心,将动力提升航空器纳入14 CFR第21.17(b)条“特殊类别航空器”审定路径,并于2024年11月正式发布第194部特殊联邦航空条例(SFAR No. 120),系统性规定驾驶员资质、训练与运行规则;欧盟EASA体系以《认证规范》(CS)为核心,发布SC-VTOL专用条件,将VTOL航空器分为Basic(基本型)与Enhanced(增强型)两类认证类别,Enhanced类适用于人口密集区上空或商业载人运输,灾难性失效概率要求对齐CS-25/29的 10^{-9} /飞行小时;中国CAAC体系以《中国民用航空规章》(CCAR)为核心,于2026年2月12日发布《动力提升航空器适航标准》(AC-21-AA-2026-45)。三大体系均以国际民航组织(ICAO)制定的国际标准与建议措施(SARPs)为参考框架^[1]。

1.3 动力提升航空器定义与分类

动力提升航空器是一种重于空气的航空器,能够垂直起飞、垂直着陆与低速飞行,在垂直与低速状态下主要依靠发动机驱动的动力装置提供升力,在水平巡航状态下依靠非旋转翼面提供气动升力。中国民航《动力提升航空器适航标准》将其适用范围限定为:有人驾驶、纯电供能分布式电推进、最大起飞重量 $\leq 5700\text{kg}$ 、最大乘客数 ≤ 9 座、非增压座舱、最大速度 $\leq 463\text{km/h}$ 。按照气动构型与升力转换方式,可分为三类典型技术路线:复合翼构型独立设置升力系统与巡航推力系统;部分倾转构型仅部分动力装置可倾转;全倾转构型则动力装置可以实现一同倾转。分类适航的意义不在于区分气动外形,而在于审查不同构型下关键失效、过渡转换与操纵品质的风险。

1.4 动力提升航空器适航标准发展历程

动力提升航空器适航标准经历了从空白摸索到专项完善的演进:2018年EASA发布SC-VTOL-01第一版建议稿;2020年GAMA发布eVTOL飞行控制概念文件;2024年11月FAA发布第194部SFAR规则;2026年2月CAAC发布《动力提升航空器适航标准》。三大体系从早期类比传统规章,逐步转向针对悬停、过渡与翼载飞行各阶段制定专项要求^[2]。

2 传统航空器与动力提升航空器适航标准对比

2.1 适航理念的差异

传统23部和25部以固定翼飞机为基准,飞行章节的核心是失速、配平、稳定性、操纵性、起飞着陆性能、爬升性能和高速特性。27部和29部以旋翼航空器为基准,核心是悬停、垂直飞行、自转、旋翼失效、单发或多发性能、旋翼结构和旋翼操纵系统。动力提升航空器规章的根本差异在于:它不预设单一升力机理,而是要求申请人对所有飞行构型建立正常、运行和限制飞行包线,并证明从一种飞行状态平稳过渡到另一种飞行状态时不会超过批准包线。

传统飞机规章也要求操纵性和稳定性,但并不天然覆盖“由推力承载到机翼承载”或“地速/气速参考控制律转换”的风险。这种变化使审查重点从“某一类别航空器在典型包线中的表现”转向“航空器在多种升力来源和控制模式之间切换时是否保持

连续安全”。

2.2 技术条款适用性分析

传统规章按类别划定要求:23/25部围绕失速速度、起飞着陆距离和爬升梯度构建固定翼性能体系;27/29部围绕悬停升限、自转性能和高度-速度包线构建旋翼性能体系。动力提升专用规章将传统部章拆解后重组,核心差异体现在四方面:(1)飞行性能方面,传统23.49条失速速度的定义基于气动失速,假定航空器始终处于翼载飞行;而动力提升航空器在悬停与过渡状态下升力由推力矢量与机翼气动力共同决定,传统失速模型不再适用。新型标准以“最小安全速度”替代失速速度概念,并引入“临界动力变化”替代“临界发动机失效”——最危险情形可能是最大非对称力矩、控制分配饱和或电源瞬态的组合,而非简单失去最大推力单元^[3]。(2)结构设计方面,传统载荷谱基于单一飞行模式,动力提升航空器需覆盖多旋翼、过渡与固定翼三态的多模式载荷谱,分布式动力非对称推力产生的突加载荷在传统规章中缺乏对应条款。AC-21-AA-2026-45要求建立覆盖所有构型的飞行载荷包线,并将地面效应、侧风、旋翼-机翼干扰等纳入模型验证。(3)动力装置方面,传统燃油系统条款(如23.955、23.965)不适用于锂电池与分布式电机。新增CPL.2430(能量存储独立性)与CPL.3328(软件/电子硬件设计保证等级)。增程式或混合电推进不在现有AC范围内,需通过专用条件补充。(4)飞行操纵方面,传统条款(如23.143、23.677)以飞行员直接控制气动面为前提。新型采用全权限电传飞控,飞行员通过控制律间接控制多动力单元与气动面。CPL.2135要求在各飞行形态与失效状态下无需特殊驾驶技能即可操纵,将传统分散的操纵性条款整合为面向自动化系统的性能目标。

2.3 持续适航管理差异

传统持续适航以固定周期检修、机械磨损管控和人为失误预防为核心。动力提升航空器新增电池衰减监控、飞控软件迭代等管理内容。软件构型管理与升级后的适航验证是当前全球共同面临的待解决技术与管理挑战——目前尚未形成成熟的OTA适航机制,需建立与失效状态相称的设计保证等级体系,并在运行中通过持续适航监控闭环反馈^[4]。

3 动力提升航空器适航重点关注内容

3.1 新构型气动性能与动力失效安全性审查

复合翼构型适航审查,要求申请人搭建随空速、迎角、姿态及构型动态变化的气动数据库,全面覆盖地面效应、侧风、旋翼机翼干扰等非线性的工况。符合性验证须覆盖各飞行阶段及最大重量、高温高原极端组合。动力失效审查采用“临界动力变化”方法,排查最不利组合失效。倾转构型聚焦倾转机构与控制律风险,需制定各类故障下的中止与回退策略^[5]。

3.2 新能源动力系统安全性审查

纯电动动力审查聚焦能量与功率稳定可用性,验证电池在低温、老化、快充快放、热管理受限工况下的输出稳定性,保障SOC/SOH估算精准,最低电量支撑悬停、复飞及备降,杜绝垂直关键阶段推力骤降、电源波动引发飞控与电机控制器故障。配电

系统须具备物理、热、电气三重隔离,核查接地故障检测、绝缘监测、灭火及防触电防护。氢能源动力重点管控高压储氢泄漏、可燃混合气、低温脆变等风险,针对燃料电池动态响应滞后,验证缓冲电池与燃料电池功率分配逻辑合理性,核查泄漏探测、通风防爆、坠撞隔离及运维安全,缺失标准通过专用条件补足。增程式动力需整体审定动力组合系统,核验起降与复飞工况下发电机电力能力、发动机失效时电池余量要求,防范燃油与高压电叠加的风险。核查各类供电模式切换平稳性,应杜绝推力突降情况发生。

3.3 电传飞行控制系统审查重点

审查控制律在各飞行阶段能否稳定可控。悬停阶段需关注PIO和控制饱和,须将精密悬停、侧向平移、风中定点、传感器降级与执行机构饱和状态纳入试验。过渡阶段飞控需关注过渡转换模式边界清晰性、控制律切换连续性及故障中止策略有效性。若自动化承担主控,不能将“系统失效后飞行员立即接管”作为主要安全策略^[6]。翼载飞行阶段需关注高速包线保护、最小安全速度保护等临界状态。应基于系统功能失效后果,通过系统安全评估向软件分配开发保证等级(DAL),等级分配需覆盖控制律、控制分配、传感器融合、电机控制、健康管理及告警功能;依据CPL 3328,等级分配范围应扩展至飞控与能源管理一体化软件,采用结构化等适宜开发方法,以满足与各失效状态相对应的软件保证目标。

4 结束语

FAA、EASA与CAAC三大体系的动力提升航空器适航框架正在收敛到同一逻辑:以飞行形态、失效后安全目标和运行场景确定审定要求,而非以“像飞机还是像直升机”作为分类。三大体系核心差异在于美国重实操与商业化进度、欧盟重系统性安全

与条款颗粒度、中国重产业适配与渐进完善。未来动力提升航空器适航标准发展应聚焦三方面:一是国际标准协调,缩小各体系在安全要求与条款颗粒度上的分歧;二是新能源与智能化专项标准细化,补足氢能、增程式和OTA适航验证技术缺口;三是审定与运行衔接优化,确保设计安全目标在实际运行中通过训练、维修、持续监控有效保持。

[参考文献]

[1]美国联邦航空局.14 CFR Part 194,Powered-Lift Special Federal Aviation Regulation[S].2024.

[2]中国民用航空局航空器适航审定司.AC-21-AA-2026-45动力提升航空器适航标准[S].2026.

[3]European Union Aviation Safety Agency. Special Condition for VTOL Aircraft (SC-VTOL), Issue 2[S].2024.

[4]中国民用航空局.CCAR-23-R4正常类飞机适航规定[S].2024.

[5]孙滨,付双检,牟浩蕾,等.新型垂直起降(VTOL)航空器适航审定规则研究及建议[J].民航管理,2022(2):61-64.

[6]隋立军,马聪瑶,刘敏.民用飞机机载系统与设备适航管理的思考[J].航空标准化与质量,2023(6):34-37.

作者简介:

牟忆豪(1993--),男,汉族,四川省成都市人,二级飞行员,主要研究方向:试飞技术、飞行教学。

王永铮(1994--),男,汉族,河南省洛阳市人,二级飞行员,主要研究方向:试飞技术、飞行教学。

张泽宇(1990--),男,汉族,四川省成都市人,讲师,主要研究方向:试飞工程技术、飞行理论教学。