

# 航空发动机吞鸟与鸟撞飞机适航通用分析方法

罗刚<sup>1</sup>,张海洋<sup>2</sup>,吴春波<sup>1</sup>,陈伟<sup>1</sup>,丁振东<sup>1</sup>

(1.南京航空航天大学能源与动力学院,南京 210016;

2.中国航发沈阳发动机研究所辽宁省航空发动机冲击动力学重点实验室,沈阳 110015)

**摘要:**针对现行有效的14 CFR中Part33有关发动机吞鸟和Part25有关飞机鸟撞的适航规章,分析和对比了相关规章的发展历史、实施范畴和实施重点,掌握了相关规章的内涵和外延,根据规章中验证方法的内容和特点,揭示了相关规章的设置目的、验证方法、设备需求等关键技术问题,梳理了相应技术体系,提出了可借鉴的通用适航符合性分析方法与流程。

**关键词:** 吞鸟;鸟撞;适航;通用分析方法;航空发动机

中图分类号: V219

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.06.017

## General Airworthiness Analysis Method of Aeroengine Bird Ingestion and Aircraft Bird Impact

LUO Gang<sup>1</sup>, ZHANG Hai-yang<sup>2</sup>, WU Chun-bo<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, DING Zhen-dong<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Key Laboratory of Impact Dynamics on Aero Engine, Liaoning Province, AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The development history, the implementation category and the implementation focus of the relevant regulations were analyzed and compared with respect to the current valid 14 CFR airworthiness regulations of part 33 related to engine bird ingestion and Part25 related to the aircraft bird impact. The connotation and extension of the relevant regulations were mastered. According to the contents and characteristics of the verification method in the regulations, the key technology problems such as the setting purpose, the verification method and the equipment demand of the relevant regulations were revealed, the corresponding technical system was sorted out, and the applicable general airworthiness analysis method and process could be used for reference.

**Key words:** bird ingestion; bird impact; airworthiness; general analysis method; aeroengine

## 0 引言

航空发动机吞鸟和飞机遭遇鸟撞击极易导致严重事故,引发公众对航空安全的高度关注<sup>[1-3]</sup>。世界各航空大国均针对发动机吞鸟和鸟撞飞机问题制订了适航规章,规定了发动机和飞机在遭遇鸟的吸入或撞击后必须具备的基本安全性能和工作能力,同时也以明确或潜在的方式规定了考核发动机或飞机具备上述能力所必须开展的设计、分析、考核、验证等的流程、方法和设备技术要求<sup>[4-6]</sup>。目前,强制贯彻相应适航规章要求及其背后隐藏的符合性设计与验证技术方法已成为保障航空安全和公共利益的主要措施,也是各类先进航空器装备市场准入的主要手段<sup>[7]</sup>。

发动机吞鸟和鸟撞飞机的危害性究其本质,是鸟体与发动机部件/飞机部件间高速相对作用所带来的机械损伤及其衍生的安全性问题<sup>[8-9]</sup>,鉴于发动机吞鸟和鸟撞飞机具有一定类似性,国外以美、欧为代表,依托美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)、美国国家交通安全局(National Transportation Safety Board, NTSB)、国际鸟撞委员会(International Bird Impact Committee, IBSC)、欧洲航空安全局(European Aviation Safety Agency, EASA)等部门和机构,对发动机吞鸟和鸟撞飞机开展了系统性的事故调查、调研分析、数值模拟与试验验证,以及部件、组件和整机的适航符合性设计与验证等大量

收稿日期:2019-04-18 基金项目:国家自然科学基金(51575262,51475227)资助

作者简介:罗刚(1980),男,博士,研究方向为航空发动机适航符合性设计与验证、结构冲击动力学等;E-mail:mevislab@nuaa.edu.cn。

引用格式:罗刚,张海洋,吴春波,等.发动机吞鸟与鸟撞飞机适航通用分析方法[J].航空发动机,2019,45(6):90-96. LUO Gang, ZHANG Haiyang, WU Chunbo, et al. General airworthiness analysis method of aero-engine bird ingestion and aircraft bird impact [J]. Aeroengine, 2019, 45(6): 90-96.

工作<sup>[10-16]</sup>。国内目前主要针对各自领域的适航符合性方法开展了初步研究<sup>[17-20]</sup>,在规章制定、调研分析、验证工作等方面,需要掌握相关适航规章的内涵和外延,才能为进一步发展相应的适航符合性设计与验证工作奠定基础。

本文针对现行有效的适航规章第14部(14 Code of Federal Regulation, 14 CFR) CFR的Part 25/Part 33中与发动机吞鸟和鸟撞飞机有关的内容,分析了相关规章产生的背景、来源、历史沿革、发展轨迹、重点涵盖内容等,掌握了相应规章的内涵和外延,梳理了相应技术体系与设备技术要求,提出了可借鉴的通用适航符合性分析方法与流程。

## 2 规章历史沿革与内容分析

### 2.1 规章历史沿革

Part 25与Part 33是美国FAA颁布的有关飞机和发动机的现行有效适航规章,通过梳理美国CFR规章的历史沿革,可以清晰地把握规章的发展背景和技术要求,上述相应规章的历史发展沿革如图1所示。

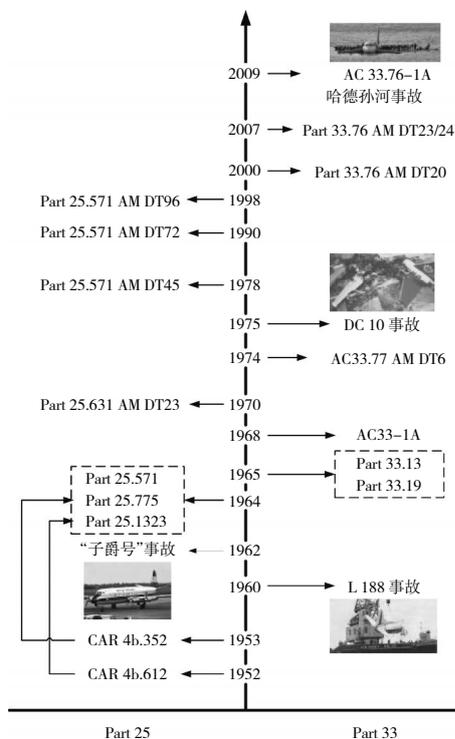


图1 14 CFR Part 25和Part 33的历史发展沿革

在鸟撞飞机的适航规章方面,早在1952年美国民航局(Civil Aviation Bureau, CAB)颁布的民用航空规章(Civil Aviation Regulation, CAR)CAR 4b.612就规定了空速管系统规避鸟撞的要求<sup>[21]</sup>,1953年,CAR

4b.352中规定了飞机风挡和支撑必须承受海平面飞行速度下1.8kg鸟的撞击<sup>[22]</sup>,FAA从1964年起陆续将CAR转变为CFR, Part 25.571<sup>[23]</sup>、Part 25.775<sup>[24]</sup>分别对飞机的结构疲劳、鸟撞风挡做出了规定,继承了CAR 4b.352的要求;Part 25.1323<sup>[25]</sup>继承了CAR 4b.612的规定;1962年,子爵号飞机在飞行中遭遇小天鹅撞击而失事<sup>[26]</sup>,随后Amdt 25-23<sup>[27]</sup>新增了25.631尾翼鸟撞评估内容,Amdt 25-45<sup>[28]</sup>针对鸟撞后飞机的总体结构和损伤容限进行了规定,Amdt 25-72<sup>[29]</sup>新增了验证时需满足海平面至海拔高度约2438m条件下 $V_c$ 撞击速度的要求;Amdt 25-96进行了撞击速度要求的补充说明<sup>[30]</sup>。

发动机吞鸟的适航规章制定的时间稍晚于鸟撞飞机规章。1960年,美国东方航空公司Electra L188型涡轮螺旋桨客机波士顿吞鸟事故<sup>[31]</sup>引发了对于航空发动机吞鸟适航管理问题的关注;1965年FAA颁布了专门针对航空发动机吞鸟适航的规章Part 33.13/19<sup>[32]</sup>,首次强制规定了民用航空发动机必须通过吞鸟符合性验证;1968年的AC 33-1A<sup>[33]</sup>提高了吞鸟验证时采用的大鸟的质量标准,将其质量上限提升为2.27kg磅;Part 33.77 Amdt 33-6<sup>[34]</sup>进一步规范了吞鸟适航验证时采用的鸟的质量和数量;Amdt 33-20<sup>[35]</sup>要求根据发动机迎风面积等参数开展发动机吸群鸟验证试验;Amdt 33-23/24<sup>[36]</sup>进一步提升了发动机吞鸟后的性能要求,并增加了吸入大型群鸟的验证内容;2009年的AC 33.76-1A<sup>[37]</sup>更加重视分析/计算与试验验证相结合的符合性验证方法。

从图1中可见,无论是Part 25还是Part 33,从问世起就处在不断的动态调整中,Part 25在46年内总共升级调整了7次,Part 33在44年内同样升级调整了7次,每次的升级和调整都进一步提升了相应的技术指标,或者对符合性验证的技术要求进行了进一步说明。从规章的历史发展沿革中可以发现,虽然由于早期受技术条件限制,FAA对于航空事故原因调查时间较长,但一定会有最终确认的调查结果,且调查结果深度推动了适航规章的发展,FAA分别经过8年和5年的调查分析,在管控相应事故原因基础上,创新性地提出了Part 25.631、Part 33.13/19;Part 25最近更新的时间是1998年,Part 33最近更新时间是2009年,近年来,Part 33的更新频率比Part 25的快,这也从侧面说明了目前航空发动机吞鸟对航空安全带来的威胁与挑战要高于鸟撞飞机的情况。

## 2.2 规章内容

Part33 中有 2 条与发动机吞鸟相关的规章,分别从吞鸟后限制出现的发动机故障(33.75)和吞鸟适航取证的具体规定(33.76)2 个方面给出了发动机吞鸟的适航符合性要求,分别规定了发动机吸入大鸟和中鸟后不得出现具有危害性的发动机故障,以及取证时不同发动机迎风面积要求吸入的鸟的数量、质量及试验流程的具体要求。具体内容对比见表 1。

表 1 现行有效的 Part25 鸟撞飞机和 Part33 发动机吞鸟规章内容对比

内容	Part25	Part33
投鸟质量范围	1.8kg/3.6kg,按撞击部位分 2 个等级	85g-3.6kg,按迎风面积分 14 个等级
投鸟速度范围	海平面 $V_c$ 或 2450m $0.85V_c$ 中较严重者	103m/s 及不低于 $V_1$ 速度
投鸟数量	1 只 / 次	1~16 只 / 次,并有时间、位置和顺序要求
目标形式	固定式标靶	旋转式标靶
撞击部位	飞机任何可能遭遇撞击的主体部位(包含机头、机翼、尾翼、风挡、挂架、起落架、发动机短舱唇口等)	发动机第 1 级风扇转子及叶片
具体要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 主体结构受到 1.8kg 鸟撞后,飞机必须能够成功地完成该次飞行;</li> <li>2. 风挡经受 1.8kg 鸟撞不被击穿,内层碎片危害最小;</li> <li>3. 尾翼经受 3.6kg 鸟撞之后,飞机继续安全飞行和着陆;</li> <li>4. 空速管系统必须保证不能因鸟撞同时损坏</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 吸入大鸟后不得出现具有危害性的发动机后果;</li> <li>2. 吸入中鸟和小鸟后功率或推力损失不得高于 25%;</li> <li>3. 吸入大型群鸟后功率或推力损失不得高于 50%</li> </ol>

从表中可见,发动机吞鸟与鸟撞飞机适航符合性验证所需要的鸟的质量上限基本相同,但验证时对投鸟速度有各自特定的要求,投鸟的数量、形式、撞击部位与飞机和发动机的工作特点密切相关,在适航验证的具体要求中均考虑了部件、组件、整机的性能、结构安全和损伤容限。从规章发展沿革可见,国外业界对鸟撞飞机的认识较早,相应的规范要求制订时间也较早,对于发动机吞鸟的认识时间跨度较短,但是对发动机吞鸟的危害性认识较为深刻,对发动机吞鸟适航验证的具体要求十分详细。无论是 Part25 还是 Part33,都结合了规章起源、事故调查、数据资料升级等大量工作,使得相应的规章不断保证航空安全。

从条款对比也可见,航空发动机吞鸟的设计和验证要求的复杂程度要超过鸟撞飞机的情况,主要表现在:(1) 航空发动机吞鸟试验设备需要具备涵盖发射 14 个质量等级弹丸的能力,而飞机鸟撞试验只要求发射 2 个质量等级的弹丸;此外,航空发动机吞鸟适航验证早期分析时弹丸投射的相对速度可能达到 350m/s 以上的水平,远超飞机鸟撞分析与试验时的相对速度范围,因此,发动机吞鸟验证设备设计与分析技术要求较高;(2) 发动机吞鸟试验需要在极短时间内按约定顺序发射多个弹丸,而飞机鸟撞试验只需要单发发射,因此吞鸟试验验证还有额外的对鸟体数量和发射顺序的控制要求;(3) 发动机吞鸟试验最大的特点是需要冲击旋转叶片,而飞行器鸟撞试验只需要撞击固定标靶,旋转试验中的弹丸落点控制难度远超固定打靶。上述差别也对航空发动机吞鸟适航符合性设计与验证提出了更高的技术要求。

## 3 规章内涵与外延分析

### 3.1 公众安全需求

Part25 中有关鸟撞飞机的 4 个规章设置的主要目的是保证飞机在一定飞行速度下遭遇一定质量的鸟撞击后,必须保证主体结构、风挡、尾翼、控制系统和测量系统具有最低安全性;Part33 中有关发动机吞鸟的 2 个规章的主要目的是保证发动机在一定工作状态下吸入不同质量和数量的鸟类后,必须保证最低的工作性能和结构安全性。其规章设计的核心是通过强制的指标要求和验证手段保障飞行器和发动机的安全工作,使得乘坐、使用相应飞行器和发动机的公众航空安全得到根本保障,维护公众的生命安全和财产利益。因此,维护航空活动中的公众利益是 Part25 和 Part33 相关规章订立的历史背景和根本需求,这也促使了适航管理部门采用类似的手段不断建立规章基础、提升技术指标和验证要求,并通过 AC 通告、AMDT 修正案等不断升级规章,持续保护公众的安全和利益,久而久之,这也成为成熟航空器和发动机产品进行市场准入管理的有效尝试。

Part25 和 Part33 有关规章的升级过程也印证了规章保护公众利益需求的发展过程,由于航空事故极易造成重大人员伤亡,严重威胁了公众利益,因此一旦发生事故,管理调查部门一定会进行详尽的原因调查,从而不断发现和填补强制规章中的漏洞,使

得航空变得越来越安全,历史上的几次著名的航空事故均促成了相应适航规章的重要升级。保障航空安全和公众利益,建立完善的规章建立、事故调查、使用数据反馈、咨询通告、颁布修正案、强制准入等措施和体系,是 CFR 规章对国内相关适航工作的重要启示,根据国外先进经验,提出了中国 CCAR25 和 CCAR33 的鸟撞和吞鸟适航规章建立、升级与贯彻流程建议,如图 2 所示。

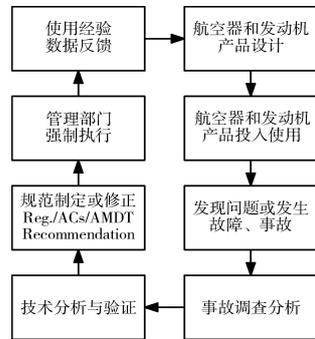


图 2 吞鸟 / 鸟撞规章制定、升级与贯彻闭环流程

### 3.2 相同的故障本质和类似的故障模式

Part33 涉及的发动机吞鸟及 Part25 所涉及的鸟撞飞机,其故障的本质是鸟体与发动机 / 飞机部件间高速相对运动而在发动机 / 飞机结构中产生的突加高能载荷分布、作用和传递导致的机械损伤,以及由上述机械损伤进一步衍生出的疲劳与损伤容限能力下降,机械组件结构失稳,部件或组件气动性能恶化等二次损伤。相应的评估工作、涉及的发动机 / 飞机部件及对应的适航规章如图 3 所示。

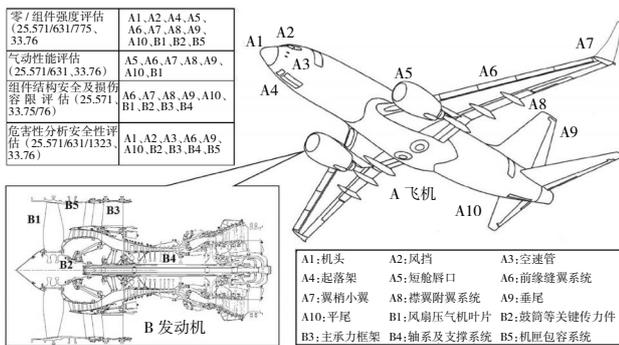


图 3 Part25 和 Part33 涉及的部件及评估要求

从鸟撞引起机械损伤的机理角度而言,由于相对高速运动的鸟体撞击目标后极短时间内减速流变,导致鸟体内产生激波后压力作用于结构表面形成瞬间高压载荷,当此载荷在结构中引发的动态响应超出了结构或材料的承受能力时,便会致结构的弯曲、断裂、撕裂、变形等机械损伤。无论鸟撞击机头、机身、机翼、尾翼或其他飞机部件,还是发动机吞鸟后鸟体撞击帽罩、风扇叶片、支板等发动机部件,其鸟撞击损伤的机理、过程和失效模式是相同的,因此其分析与验

证方法也是类似的,均须掌握鸟、金属材料、复合材料等动力学性能参数和高应变率下的本构模型,鸟撞击单 / 多个静止和旋转部件的数值模拟技术以及鸟撞击试验技术。

从鸟吸入和撞击导致的结构安全性分析角度而言,由于吞鸟和鸟撞击损伤的根源在于鸟体与构件高速相对作用过程中产生的突加高能载荷的分布、作用与传递,因此,在 Part25 和 Part33 中涉及的疲劳寿命、损伤容限、结构安全及其评估等验证工作必须掌握突加高能载荷在机械结构中的产生、分布与传播规律,并针对不同的工作情况开展安全性评估,Part25 与 Part33 在此方面的分析与验证方法也是类似的,必须掌握复杂机械结构载荷传递的建模与数值分析方法、FMECA 危害性分析方法及机械组件结构冲击试验与测试技术。

由于 Part25 和 Part33 中均提到了鸟撞和吞鸟后的飞行工作能力和总体性能,从鸟撞击和吸入导致的气动性能恶化角度分析,飞行器和发动机性能恶化的原因是鸟撞击导致部件气动构型变化,破坏了原先的气动型面,导致流动效率降低、气流分离、气动阻力增加等问题,此外,由于撞击破坏了原有的流固耦合平衡状态,部件在复杂气流的作用下可能发生颤振等问题,导致结构失稳或破坏,严重影响性能,因此,Part25 和 Part33 要求在气动性能分析方面也可采用通用的分析方法,即必须掌握变形表面的气动性能分析方法和流固耦合分析方法。

### 3.3 通用的特种试验设备和试验方法

在 Part25 和 Part33 中均规定要对飞机部件和发动机部件 / 整机开展鸟撞和吞鸟试验,以验证其在遭遇鸟撞或吞鸟后保证基本安全性的能力,由于鸟和飞机 / 发动机间相互作用带来的冲击动力学分析和验证需求表明二者的验证手段有较大共通之处,虽然飞机和发动机具有不同的工作特点,所采用的关键技术和关键试验方法存在一定的差别,但是在早期设计验证或零部件级的设计和验证工作中,仍可以采用大量的通用特种试验设备与试验方法。

目前,空气炮冲击试验是世界上主流的鸟撞 / 吞鸟的试验验证方法,从表 1 中可见,发动机吞鸟试验的复杂程度要高于鸟撞飞机试验的复杂程度,主要体现在弹丸投射质量分布、数量和投射方式上,但上述复杂性仅限于最后的组件与整机吞鸟适航验证,根据

上述分析,从最初的材料力学性能试验到零部件的冲击试验,Part25 和 Part33 规定可采用基本类似的特种试验设备与试验方法,见表 2、3。

表 2 Part25 和 Part33 需要开展的通用试验

试验内容	试验目的
鸟的刚 / 柔性靶冲击试验	获取鸟的动态本构模型
材料动态力学性能试验	获取材料的动态本构模型
模拟件鸟撞试验	获取鸟体撞击载荷与响应,验证数值模拟算法
真实单个零件鸟撞试验	评估单个零件抗鸟撞能力
鸟撞后变形零件气动试验	评估变形零件气动性能
真实组件鸟撞试验	评估多个零件构成的组件抗鸟撞能力
真实组件损伤容限试验	评估鸟撞后组件的损伤容限设计能力和结构安全性

表 3 关键试验设备、试验方法及功能

试验设备及试验方法	功能
材料力学试验设备 MTS/SHPB 试验方法	获取材料准静态和动态应力应变曲线,拟合本构模型参数
撞击载荷测试设备与动态载荷测试方法	获取零件和组件鸟撞载荷、掌握载荷变化规律
动态响应测试设备与测试方法	获取零件和组件鸟撞响应、掌握响应变化规律
空气炮试验设备与高速冲击试验方法	提供投射鸟体弹丸的试验能力
风洞试验设备与测试方法	提供受损气动部件的性能测试能力
振动 / 疲劳试验设备与振动信号、寿命测试方法	提供损伤容限测试能力

### 4 通用的适航符合性设计方法及流程

在审查过程中,为向适航管理局表明发动机和飞机产品符合适航规章的要求,需要采取不同方法或多种方法组合,即向局方说明符合性验证方法,或提供有说服力的验证手段和结果。

常用的符合性验证方法通过向适航管理局提供相应的文件清单、技术说明书、计算报告、试验报告、分析报告、现场检查记录等证明材料,分别根据需要进行验证和说明的实际要求获得应用,可以采用 1 种或几种方法组合来验证和说明是否符合适航规章的规定或技术要求。

根据对 Part25 和 Part33 规章的分析对比,考虑相应验证方法所需要开展的工作和最终向局方提交的资料,将其反向映射到发动机和飞机产品的设计阶

段,提出 1 套通用的适航符合性设计方法,其流程如图 4 所示。

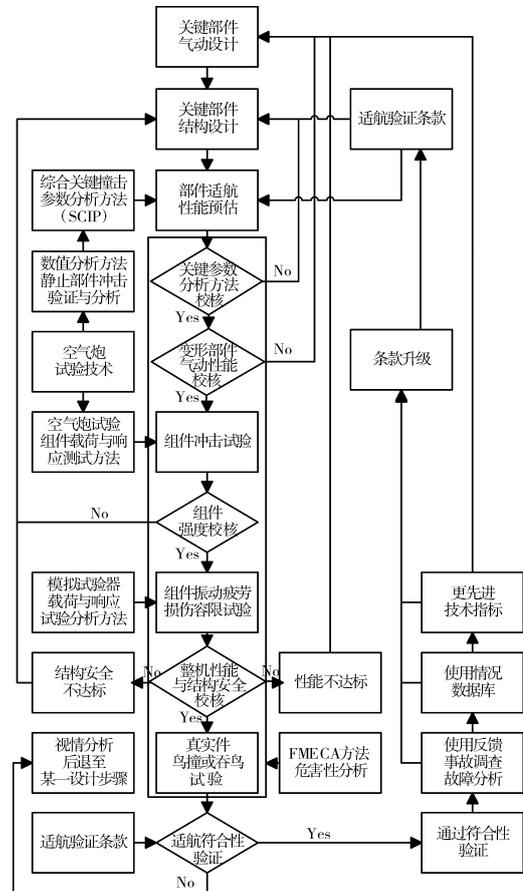


图 4 通用的适航符合性设计流程

从图中可见,根据技术性能指标要求进行关键部件如机头、机翼、风扇 / 压气机叶片等的气动型面设计,得到气动外形后按结构强度和机械设计要求进行结构设计,形成具体部件的几何模型后开展部件的适航性能预估,主要采用经空气炮冲击试验验证后的数值模拟方法结合适航规章中的“关键参数”分析方法进行规章中规定的部件强度性能评估,并对受撞击后的变形部件开展气动性能分析与校核,推算和评判受损件能否保证规章中规定的气动性能,如受损变形风扇的推力、受损变形机翼的升力和气动稳定性等,然后对含有多个部件的组件开展冲击试验,对组件进行抗冲击强度校核,评估含有多个零部件的组件在遭遇鸟撞击时的载荷分布、作用与传递导致的结构安全性影响,针对受撞击件开展振动、疲劳等损伤容限试验,判定其在相应的工作循环内是否符合损伤容限的要求,在上述评估基础上,开展整机的性能与结构安全预估,在正式取证试验前最终确定整机性能与结构安

全是否符合规章需求,否则应回到相应的设计阶段,在通过了真实件或整机鸟撞、吞鸟试验后,运用相应的符合性验证方法向适航管理局说明产品的适航性,最终通过产品使用反馈、事故调查、故障分析等手段建立使用数据库,向适航管理局和设计单位提供使用数据和使用经验,进而提升相应的考核技术指标,推动规章的升级,进一步保障航空安全和公共利益,为新一代产品的设计、改进、改型提供新一轮初始设计参数。

## 5 总结

本文对现行有效的 Part33 中有关发动机吞鸟和 Part25 中有关鸟撞飞机的适航验证规章进行了归纳与分析,梳理了相关规章的发展历史、实施范畴和实施重点,揭示了相关规章的设置目的、验证方法、设备需求等关键技术问题,提出了通用的适航符合性分析方法与流程,总结如下:

(1) Part33 和 Part25 的发展历史高度相似,均采用了规章制定、事故调查、数据分析、咨询通告、规章修正等手段不断地提升技术水平和强制性要求,其实施范畴均高度集中于吸入/撞击相关的零件、部件、组件、整机及其结构安全和损伤容限判定方法,其实施重点在于验证发动机吞鸟后和飞机遭鸟撞后的性能保持与结构安全评估。

(2) 公众对航空安全的利益需求促使 Part33 和 Part25 中相关规章的制定背景、技术要求和升级方式具有高度的一致性。

(3) 吞鸟/撞击的损伤和故障模式决定了 Part33 和 Part25 所涉及的适航符合性设计与验证方法具有高度的相似性。

(4) Part33 和 Part25 中相关规章的验证要求决定了发动机吞鸟和鸟撞飞机所需建设和发展的关键试验设备与关键试验方法具有一定的通用性和阶段性,应在建设过程中予以考虑。

(5) 提出了 1 套满足 Part33 和 Part25 相应规章要求的通用适航符合性设计方法和流程,其核心内容包含初始设计、关键参数评估、零件/组件强度性能验证、组件气动性能验证、组件结构安全性评估等环节。

### 参考文献:

[1] Thorpe J. Update on fatalities and destroyed civil aircraft due to bird

- impacts with appendix for 2008&2009 [C]// 9th Meeting of the International Bird Impact Committee. Cairns (Australia):International Bird Impact Committee, 2010:1-9.
- [2] Air Accidents Investigation Branch. Aircraft accident report: Boeing 747-136 bird ingestion accident. London (Heathrow) airport, december 6, 1997 [R]. Hampshire: Air Accidents Investigation Branch, 1999.
- [3] National Transportation Safety Board. Aircraft accident report: Boeing 767-300 bird ingestion accident, Chicago airport, march 15, 2007 [R]. Washington DC: National Transportation Safety Board, 2008.
- [4] Federal Aviation Administration. AC33.76 Airworthiness standards aircraft engines, subpart e—design and construction; turbine aircraft engines, bird ingestion [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2009.
- [5] European Aviation Safety Agency. Certification specification for engine CS-E [S]. Cologne: European Aviation Safety Agency, 2009.
- [6] Federal Aviation Administration. CFR25 FAR-25 Electronic code of federal regulations [S]. Washington DC: FAA, 2010.
- [7] Chen W, Luo G, Zhang S, et al. Development strategy of engine bird ingestion certification technology [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 32(05):485-494.
- [8] 李玉龙, 石霄鹏. 民用飞机鸟撞研究现状 [J]. 航空学报, 2012, 33(2): 189-198.
- LI Yulong, SHI Xiaopeng. Investigation of the present status of research on bird impacting on commercial airplanes [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(2):189-198. (in Chinese)
- [9] 关玉璞, 陈伟, 高德平. 航空发动机叶片外物损伤研究现状 [J]. 航空学报, 2007, 28(4):851-857.
- GUAN Yupu, CHEN Wei, GAO Deping. Present status of investigation of foreign object damage to blade in aeroengine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4):851-857. (in Chinese)
- [10] Australian Transport Safety Bureau. Australian aviation wildlife impact statistics: bird and animal impacts 2002 to 2009 [R]. AR-2009-064.
- [11] Shupikov A N, Ugrimov S V, Smetankina N V, et al. Bird dummy for investigating the bird-impact resistance of aircraft components [J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(3):817-826.
- [12] Guida M, Marulo F, Meo M, et al. Certification by bird impact analysis on C27J fullscale ribless composite leading edge [J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 54:105-113.
- [13] Smojver I, Ivancevic D. Numerical simulation of bird impact damage prediction in airplane flap structure [J]. Composite Structures, 2010, 92(9): 2016-2026.
- [14] Imregun M, Vahdati M. Aeroelasticity analysis of a bird-damaged fan assembly using a large numerical model [J]. Aeronautical Journal, 1999, 103(1030):569-578.
- [15] Prakash R, Channegowda H, Kaliyaperumal A. A study on bird impact damages on shrouded fan blades of an aero-engine [C]//ASME 2013 Gas Turbine India Conference. Bangalore, Karnataka, India: American Society of Mechanical Engineers, 2013: V001T05A022 (1-10).
- [16] Handschuh K M, Miller S G, Sinnott M J, et al. Materials, manufacturing and test development of a composite fan blade leading edge

- subcomponent for improved impact resistance [J]. Japanese Journal of Acute Medicine, 2014, 34(2):485-489.
- [17] 顾晨轩, 苏艳, 王辉. 国内外运输类鸟撞飞机适航条款及其修订背景研究分析 [J]. 科技创新导报, 2017(7):247-249.  
GU Chenxuan, SU Yan, WANG Hui. Research and analysis on airworthiness clause and revision background of domestic and foreign transport bird impact aircraft [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017(7):247-249. (in Chinese)
- [18] 何思, 刘存喜. 运输类飞机风挡抗鸟撞适航符合性验证方法 [J]. 航空工程进展, 2016, 7(2):186-190.  
HE Si, LIU Cunxi. A verification method of bird-impact resistance airworthiness for transportation category airplane's windshield [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(2):186-190. (in Chinese).
- [19] 张柱国, 郝一鸣. 运输类鸟撞飞机及符合性验证综述 [J]. 航空科学技术, 2013(6):1-4.  
ZHANG Zhuguo, HAO Yiming. Review about bird impact and substantiation for transport category airplane [J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(6):1-4. (in Chinese)
- [20] 罗刚, 陈伟, 赵振华, 等. 航空发动机吸鸟适航验证关键参数分析方法 [J]. 机械科学与技术, 2016(11):1774-1779.  
LUO Gang, CHEN Wei, ZHAO Zhenhua, et al. Analysis method of critical parameters on aircraft engines bird ingestion airworthiness certification [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016(11):1774-1779. (in Chinese)
- [21] Civil Aviation Bureau .CAR 4b.612 Civil air regulations amendment 4b-6 [S]. Washington DC: Civil Aeronautics Board, 1952.
- [22] Civil Aviation Bureau. CAR 4b.352 Part 4b Airplane airworthiness transport categories [S]. Washington DC: Civil Aeronautics Board, 1953.
- [23] Civil Aviation Bureau. Sec. 25.571 Part 25 Airworthiness standards transport category airplanes [S]. Washington DC: Code of Federal Regulations, 1964.
- [24] Civil Aviation Bureau .Sec. 25.775 Part 25 Airworthiness standards transport category airplanes [S]. Washington DC: Code of Federal Regulations, 1964.
- [25] Civil Aviation Bureau. Sec. 25.1323 Part 25 Airworthiness standards transport category airplanes [S]. Washington DC: Code of Federal Regulations, 1964.
- [26] Civil Aviation Bureau. Aircraft accident report, United Air Lines, Inc., Vickers-Armstrongs viscount, N7430, near Ellicott City, Maryland. november 23, 1962 [R]. Washington DC: Civil Aviation Bureau, 1963.
- [27] Federal Aviation Administration. Sec. 25.631 Amdt. 25-23 Part 25 Airworthiness standards: transport category airplanes [S]. Washington DC: Code of Federal Regulations, 1970.
- [28] Federal Aviation Administration. Sec. 25.571 Amdt. 25-45 Part 25 Airworthiness standards: transport category airplanes [S]. Washington DC: Code of Federal Regulations, 1977.
- [29] Federal Aviation Administration. Sec. 25.571 Amdt. 25-72 Part 25 Airworthiness standards: transport category airplanes [S]. Washington DC: Code of Federal Regulations, 1990.
- [30] Federal Aviation Administration. Sec. 25.571 Amdt. 25-96 Part 25 Airworthiness standards: transport category airplanes [S]. Washington DC: Code of Federal Regulations, 1998.
- [31] Boyd A S, Murphy R T, Chan G, et al. Eastern Air Lines, Inc., Lockheed Electra L-188, N5533, Logan International Airport, Boston, Massachusetts, October 4, 1960 [R]. Washington DC: Civil Aeronautics Board, 1962.
- [32] Federal Aviation Administration. Advisory circular AC33-1 Turbine-engine foreign object ingestion and rotor blade containment type certification procedures [S]. Washington DC: Federal Aviation Agency, 1965.
- [33] Federal Aviation Administration. Advisory circular AC33-1a Turbine-engine foreign object ingestion and rotor blade containment type certification procedures [S]. Washington DC: Federal Aviation Agency, 1968.
- [34] Federal Aviation Administration. AC33.77 AMDT33-6 Airworthiness standards: aircraft engines, subpart e-design and construction; turbine aircraft engines, foreign object ingestion [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 1974.
- [35] Federal Aviation Administration. AC33.76 AMDT33-20 Airworthiness standards: aircraft engines, subpart e-design and construction; turbine aircraft engines, bird ingestion [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 1999.
- [36] Federal Aviation Administration. AC33.76 AMDT33-23/24 Airworthiness standards: aircraft engines, subpart e-design and construction; turbine aircraft engines, bird ingestion [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2007.
- [37] Federal Aviation Administration. AC33.76 Airworthiness standards aircraft engines, subpart e-design and construction; turbine aircraft engines, bird ingestion [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2009.

(编辑: 刘 静)