

文章编号: 1674-8190(2022)04-117-07

# 民用飞机冲压空气涡轮系统适航工程技术研究

李焕, 邵小铃, 夏卿

(航空工业金城南京机电液压工程研究中心 能源与传动部, 南京 211106)

**摘要:** 冲压空气涡轮系统是一种飞机应急能源,其在紧急情况下为飞机提供应急液压源和/或应急电源,对飞机应对紧急情况至关重要。参照 AP-21-AA-2011-03-R4 中关于航空器生命周期审定过程划分及合格审定活动,结合某型民用飞机冲压空气涡轮系统研制过程,从识别审定基础开始,将适航条款转化成需求,落实到产品设计中,明确条款的符合性方法和验证思路,并给出民用飞机冲压空气涡轮系统适航工程技术的工作流程和方法。此套工作流程已通过某型民用飞机冲压空气涡轮系统的研制进行了初步验证,可为国内民用飞机机载系统的研制及取证过程提供参考。

**关键词:** 适航工程; 审定基础; 符合性方法; 合格审定; 冲压空气涡轮

中图分类号: V242.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.04.13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Civil Aircraft Ram Air Turbine System Airworthiness Engineering Technology

LI Huan, SHAO Xiaoling, XIA Qing

(Airborne Power Supply and Transmission Department, AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Ram air turbine (RAT) system is a kind of aircraft emergency energy, which is critical of aircraft to provide emergency hydraulic source and/or emergency power supply for aircraft in emergency. Referring to AP-21-AA-2011-03-R4 about aircraft life cycle certification process division and certification activities, combined with the development process of a certain type of civil aircraft RAT system, this paper starts from identifying the certification basis, transforms the airworthiness clauses into requirements, which are implemented into product design, clarifies the compliance methods and verification ideas of the clauses, and finally determines the workflow and method of civil aircraft RAT system airworthiness engineering technology. The workflow has been preliminarily verified by the development of a civil aircraft RAT system, which provides a reference for the development and certification process of domestic civil aircraft airborne system.

**Key words:** airworthiness engineering; certification basis; compliance means; qualification certification; ram air turbine

收稿日期: 2021-07-13; 修回日期: 2021-12-02

通信作者: 李焕, lihuanihome@163.com

引用格式: 李焕, 邵小铃, 夏卿. 民用飞机冲压空气涡轮系统适航工程技术研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(4): 117-123.

LI Huan, SHAO Xiaoling, XIA Qing. Research on civil aircraft ram air turbine system airworthiness engineering technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 117-123. (in Chinese)

## 0 引言

冲压空气涡轮(Ram Air Turbine,简称RAT)系统是一种应急能源系统,它在飞机失去主动力和辅助动力的紧急情况下释放,通过提取空气动能,为飞机关键系统提供应急液压源和/或应急电源,以保持飞机的可操纵性。由于不消耗燃料、可长时间持续工作、成本低等优点,RAT系统成为目前绝大部分大型民用飞机采用的应急能源。

适航性是指民用航空器(包括其部件及子系统)的整体性能和操纵特性在预期的运行环境和使用条件限制下具有安全性和物理完整性的一种品质<sup>[1]</sup>。适航工程是指基于CCAR-25部为代表的标准类规章及其衍生出的咨询通告(Advisory Circular,简称AC)和行业标准、规范等,进行适航工程技术研究<sup>[2-3]</sup>。

国内在适航工程技术方面有代表性的研究有:张翔伦等<sup>[4]</sup>分析了民用飞机飞控系统适航条款的相关设计要求;宋成艳<sup>[5]</sup>、辜迎佳等<sup>[6]</sup>分别对航电系统的适航验证方法进行了研究;李哲等<sup>[7]</sup>对机载系统的取证方法、取证路径等进行了阐述。但国内针对RAT系统的适航与符合性研究仍未见报道,这是由于目前国内民用客机上配套的RAT系统多来自于国外供应商,国内实际取证的型号极少,国内工业方对如何进行RAT系统的型号适航工程技术工作方面,尚缺乏经验。随着我国民用飞机研制工作尤其是大型客机项目的开展,国内RAT系统在提升正向设计能力的同时,也亟需提升适航工程技术能力以支撑型号取证工作。

基于此,本文对民用飞机RAT系统适航工程技术的工作方法进行研究,包括对适航审定基础进行总结,研究适航条款的适用性,分析每条适用条款提出的需求,落实到产品设计要求中;确定各条款的符合性方法和验证思路,最终编制符合性矩阵以及相关初始适航、持续适航文件,以期指导民用飞机RAT系统研制及取证。

## 1 某型RAT审定基础的确定和考虑

### 1.1 系统架构

系统的基本架构和组成是识别审定基础、开

展适航工程活动的前提。

某型民用飞机RAT系统物理架构如图1所示。RAT系统主要由RAT、应急发电机控制器(RAT Generator Controller Unit,简称RGCU)、收放作动筒、RAT收放阀以及液压油管等组成。其中,RAT、RGCU、收放作动筒为RAT系统的核心组件。

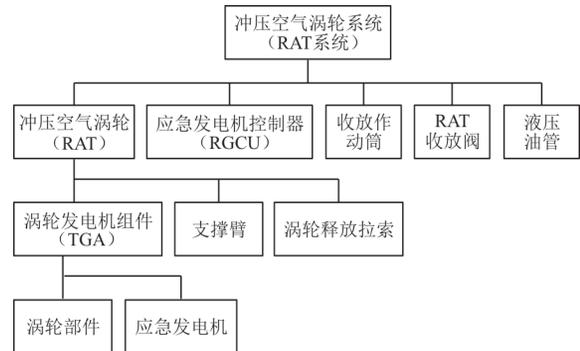


图1 某型民用飞机RAT系统物理架构  
Fig. 1 A RAT system physical architecture

RAT包含涡轮发电机、支撑臂和涡轮释放拉索。涡轮包含两个固定在旋转轮毂上的叶片,并由机械调速机构控制。发电机和涡轮共轴,为飞机提供应急能源。支撑臂用于支撑涡轮和发电机。涡轮释放拉索安装在支撑臂上,用于对涡轮限位。

收放作动筒是展开/回收单元的核心部件。它安装在RAT舱内,由弹簧驱动,并设计有液压阻尼起缓冲作用,可以通过舱门连杆克服合理的负载打开RAT舱门,将RAT推到气流中。

RGCU是RAT系统的发电机控制器,是一个简单的模拟电路板单元,由发电机永磁机供电。

### 1.2 识别审定基础

在系统研制的需求与概念论证阶段,对某型民用飞机RAT系统适用的审定基础进行识别和确认。

根据该型RAT的系统架构,其涉及机械结构、液压、电子电气等方面。对CCAR-25-R4各分部条款<sup>[8]</sup>进行逐条确认,参考已有RAT型号的研制经验和主机的技术要求,由RAT研发团队识别得到民用飞机RAT系统的审定基础,共32条,如表1所示。

表1 某型RAT系统审定基础  
Table 1 Certification basis of a RAT system

序号	条款	序号	条款
1	25.301	17	25.1301
2	25.303	18	25.1309
3	25.305	19	25.1316
4	25.307	20	25.1317
5	25.581	21	25.1351
6	25.601	22	25.1353
7	25.603	23	25.1357
8	25.605	24	25.1360
9	25.607	25	25.1363
10	25.609	26	25.1419
11	25.611	27	25.1435
12	25.613	28	25.1461
13	25.619	29	25.1529
14	25.863	30	25.1541
15	25.869	31	25.1585
16	25.899	32	附录C

在识别审定基础的过程中,关于一些条款对RAT系统的适用性存有争议,通过专家研讨交流,最终达成一致。现说明如下:

#### (1) 25.671(d)操纵系统:总则

25.671(d)要求“飞机必须设计成在所有发动机都失效的情况下仍可操纵。如果表明分析方法是可靠的,则可以通过分析来表明满足本要求。”

有专家认为,本条正是应急能源系统存在的规章原始要求,应该适用于RAT系统。但是,经过讨论,认为本条要求飞机要具有独立的应急能源系统,属于飞机级的审定基础;RAT系统作为应急能源系统中的一种,支持飞机满足该要求,但不属于RAT系统审定基础范围。

#### (2) 25.1355(c)配电系统

25.1355(c)要求“如果中国民用航空规章要求由两个独立的电源向某些特定的设备或系统供电,则这些设备或系统的一个电源一旦失效后,另一电源(包括其单独的馈电线)必须能自动或手动接通,以维持设备或系统的工作。”

本条提出了对配电系统的要求,配电系统和电源系统是两个并列系统,属于电力系统,这条适用于电力系统。RAT系统作为一种应急能源,是

电源系统的子系统,故本条不在RAT系统审定基础范围。

(3) H分部EWIS(Electrical Wiring Interconnection System)条款

CCAR-25-R4 H分部为EWIS相关要求。根据25.1701条款中EWIS的定义,RAT系统中涉及到EWIS的部件只有飞机与控制器连接的线缆。目前在某民用飞机型号的RAT系统研制中,该线缆由主机提供,因此,该型RAT系统的审定基础中不包含EWIS条款,在上一级电源系统中完整考虑了EWIS条款内容。后续型号中如果该线缆纳入RAT系统工作包,则EWIS条款应按需纳入RAT系统工作包中。

## 2 适航需求的设计考虑

审定基础识别确定后,在系统研制的初步设计阶段,要确定每条适航条款对RAT系统提出的各类需求;并按照系统工程国际委员会(INCOSE)对需求“明确、清晰、唯一、一致、独立和可验证”的要求,对其进行规范化正确化整理<sup>[9]</sup>,建立与适航条款相关的RAT系统需求矩阵。本文以CCAR 25.581闪电防护条款为例,展示由适航条款到形成需求并落实进入设计的过程。

### 2.1 条款原文解读

CCAR 25.581闪电防护条款原文要求有三条:

(a) 飞机必须具有防止闪电引起的灾难性后果的保护措施。

(b) 对于金属组件,下列措施之一可表明符合本条(a)的要求:

- (1) 该组件合适地搭接到飞机机体上;
- (2) 该组件设计成不致因闪击而危及飞机。

(c) 对于非金属组件,下列措施之一可表明符合本条(a)的要求:

- (1) 该组件的设计使闪击的后果减至最小;
- (2) 具有可接受的分流措施,使产生的电流分流而不致危及飞机。

本条款提出了对飞机闪电防护直接效应的要求。要想解读该条款,首先搜集该条款相关的适航规章、AC和行业标准,如表2所示,可以看出:最顶层的输入来源于适航标准条款,局方针对特定

要求结合审查经验发布相应的 AC 及技术标准说明 (Technical Standards Orders, 简称 TSO), 美国汽车工程师学会 (Society of Automotive Engineers, 简称 SAE)、航空无线电技术委员会 (Radio Technical Commission for Aeronautics, 简称 RTCA) 也会发布技术标准。对一条适航条款的解读, 应按照规定要求, 并借鉴 AC 和行业标准的指导意见。

表 2 闪电防护相关的行业标准  
Table 2 Industrial standard of lightning protection

序号	类型	标准号	标准名称
1	CCAR	25.581	闪电防护
2	CCAR	25.954	燃油系统闪电防护
3	CCAR	25.1316	系统闪电防护
4	AC	20-155	雷电防护试验及兼容性审查
5	AC	20-53	运输机燃油系统闪电防护
6	AMC	25.581	闪电防护
7	SAE	ARP5412B	雷电环境及相关试验波形
8	SAE	ARP5414A	飞机雷电分区
9	SAE	ARP5415A	雷电间接效应验证指南
10	SAE	ARP5416A	飞机雷电试验方法
11	SAE	ARP5577	飞机直接效应验证要求
12	RTCA	DO-160G	机载设备环境条件和试验方法
13	MIL	STD-1757A	航天器及硬件设备的雷电鉴定试验方法
14	HB	6129-1987	飞机雷电防护要求和试验方法
15	HB/Z	185-1990	民用飞机雷电防护及搭接设计指南
16	GJB	2639-1996	军用飞机雷电防护
17	GJB	3657-1999	军用飞机雷电防护鉴定试验方法

通过研读各标准<sup>[10-19]</sup>, 对 25.581 条款解读如下:

(a) 款为总则性条款, 具体要求见(b)、(c)。

(b) 款要求对金属组件与飞机机体的搭接和设计要有必要的防护措施, 在遇到闪电后不能引起灾难性后果。

(c) 款提出对非金属组件的闪电防护要求。条款中提到的使闪击的后果减至最小, “最小”并非一个量化的概念, 但至少应保证不会产生灾难性后果。同时, 可接受的分流措施也应使飞机的安全性得到保证。

## 2.2 条款转化为需求

对于 RAT 系统而言, 作为应急能源系统, 必须

保证在遭遇闪电环境时, 其工作与工作能力不受影响。结合以往 RAT 系统的设计经验, 根据需求写作标准, 整理得到 25.581 条款对应的需求:

(a) RAT 应满足 RTCA/DO 160G 23 章规定的 XX1C 类雷电直接效应试验要求。

(b) RAT 系统中的金属组件应搭接到飞机机体上。

(c) RAT 系统中的非金属组件应设计为受到闪击的后果为最小。

## 2.3 适航需求转化为设计

在系统研制的初步设计阶段, 适航条款相关的需求确定以后, 应将每条需求落实到具体的设计要求, 指导产品设计。

对于 25.581 闪电防护条款, 根据 SAE ARP5577<sup>[15]</sup>, 闪电直接效应是由于闪电通道直接附着到飞机上或闪电电流的传导在飞机或设备上产生的物理效应, 包括表面和结构的绝缘层穿透、爆破、弯曲变形、熔化、燃烧和汽化; 在导线、管路、控制线缆和其他导电部件上直接注入电压和电流; 对人员可能造成的伤害包括冲击效应和强闪光造成的炫目/失明。通常, 为表明对闪电直接效应的符合性, 一般需要进行 6 项工作, 包括:

- (1) 确定闪电区域划分;
- (2) 建立与闪电区域有关的闪电环境;
- (3) 进行闪电危害性评估;
- (4) 根据可接受的准则进行闪电防护设计;
- (5) 符合性验证;
- (6) 确定并实施纠正措施。

对于 RAT 系统, 按照标准中推荐的上述工作步骤(1)~步骤(4)开展对本条款的设计工作。

(1) 虽然雷击区在任何飞机上的位置取决于飞机的几何形状和操作因素, 但是 SAE ARP 5414<sup>[12]</sup>给出了目前国际上通行的闪电区域划分方法。航空工业金城南京机电液压工程研究中心根据某型 RAT 系统在飞机上的位置, 参考 ARP 5414 中的划分, 并与主机厂协商确定某型 RAT 系统属于飞机闪电 1C 区域。

(2) 外部闪电环境由 SAE ARP 5412<sup>[13]</sup>定义, 某型 RAT 系统闪电直接效应试验类别为

XX1C类。

(3)对RAT系统进行闪电影响的评估以确定闪电可能造成的安全性后果。根据安全性评估,与闪电有关的系统内部部件的失效或故障都必须表明符合25.581条的要求。

(4)闪电防护设计可从已有的设计经验、具有参考价值的设计指导或以前验证过的手册数据而来。而新的设计可能要求进行研发试验以证明其符合相关性能指标的要求。

RAT系统的闪电防护主要包括电搭接和雷电传导路径设计。电搭接设计包括搭接线规格选择、搭接方式、结构材料选择、标准件紧固件选用等,并保证搭接电阻在规定值内。雷电传导路径设计主要针对涡轮发电机组件,航空工业金城南京机电液压工程研究中心RAT研发团队重点对该组件进行了内部结构分析,确定雷电可能的传导路径,仿真雷电对经过处零件的影响,并据此设计

合理的雷电路径,选取合适的轴承等零件。

### 3 符合性验证与实施

#### 3.1 符合性方法

根据AP-21-AA-2011-03-R4《航空器型号合格审定程序》<sup>[20]</sup>,目前型号合格审查过程中通用的符合性方法(Means of Compliance,简称MC)共10种,其中系统及子系统级常用的MC有:MC1(说明性文件)、MC2(分析/计算)、MC3(安全评估)、MC4(试验室试验)、MC9(设备合格性)。

在系统研制的详细设计阶段,某型RAT系统的设计工作完成后,针对审定基础,根据已有型号经验总结和专家讨论,根据适航条款的具体要求选取其中的一种或多种组合方式来满足条款的要求。以25.581闪电防护条款为例,展示条款的符合性思路,如表3所示。

表3 符合性矩阵

Table 3 Compliance matrix

条款	条款原文	需求描述	设计要求	符合性方法	符合性思路	符合性文件
25.581(a)	(a)飞机必须具有防止闪电引起的灾难性后果的保护措施。	RAT应满足RT-CA/DO-160G 23章规定的XX1C类雷电直接效应试验要求。	(1)确定RAT系统安装的闪电区域。	MC2	对雷电直接效应影响开展仿真分析	雷电分析报告
			(2)根据SAE ARP 5412定义,确定RAT系统闪电直接效应试验类别。			
25.581(b)	(1)该组件合适地搭接到飞机机体上; (2)该组件设计成不致因闪击而危及飞机。	RAT系统中的金属组件应搭接到飞机机体上。	(3)对RAT系统进行闪电影响评估以确定闪电可能造成的安全性后果。	MC4	按RTCA/DO-160G开展雷电直接效应试验	雷电试验报告
			(4)RAT系统的闪电防护主要包括电搭接和雷电传导路径设计。其中重点是对涡轮部件进行内部结构分析,确定雷电在涡轮内部可能的传导路径,并仿真雷电对经过处零件的影响,并据此选择合理的雷电路径。			
25.581(c)	(c)对于非金属组件,下列措施之一可表明符合本条(a)的要求: (1)该组件合适地搭接到飞机机体上; (2)该组件设计成不致因闪击而危及飞机。	RAT系统中的非金属组件应设计为受到闪击的后果为最小。	RAT系统中的金属组件应搭接到飞机机体上,应考虑搭接形式和布局。  非金属部件的布置应避开电流传导路径;并分析产品内部非金属部件的材料,考虑雷击对材料的影响。	MC1	生产图样和设计文件说明	图样 (含电搭接)
25.581(c)	(c)对于非金属组件,下列措施之一可表明符合本条(a)的要求: (1)该组件的设计使闪击的后果减至最小; (2)具有可接受的分流措施,使产生的电流分流而不致危及飞机。	RAT系统中的非金属组件应设计为受到闪击的后果为最小。	非金属部件的布置应避开电流传导路径;并分析产品内部非金属部件的材料,考虑雷击对材料的影响。	MC2	对雷电直接效应影响开展仿真分析	雷电分析报告

### 3.2 符合性验证

符合性方法确定以后,在系统研制的试制与验证阶段,应开展符合性验证活动。

针对 25.581 条款,某型 RAT 系统进行了雷电防护设计,并进行了有限元仿真分析,尤其是对涡轮中的滚珠轴承,进行了遭受雷击时电流流经的影响分析。根据仿真结果,产品的闪电防护设计预期可实现雷电防护需求,并且涡轮部件和应急发电机分别实施了雷击研发试验,尤其是涡轮雷击研发试验,为国内首次。试验后分解显示涡轮内部结构保持完好,雷电导电路径与设计一致,试验后复测均满足设计要求,初步验证了闪电防护设计的正确性。

### 3.3 符合性矩阵

在某型 RAT 系统中,从识别审定基础开始,经过需求转化,需求落实为设计,最终选择符合性方法对条款进行验证。结合 AP-21-AA-2011-03-R4 和 HB 8525—2017《民用飞机研制程序》<sup>[21]</sup>,可以将这一流程和工作成果进行总结,如图 2 所示。

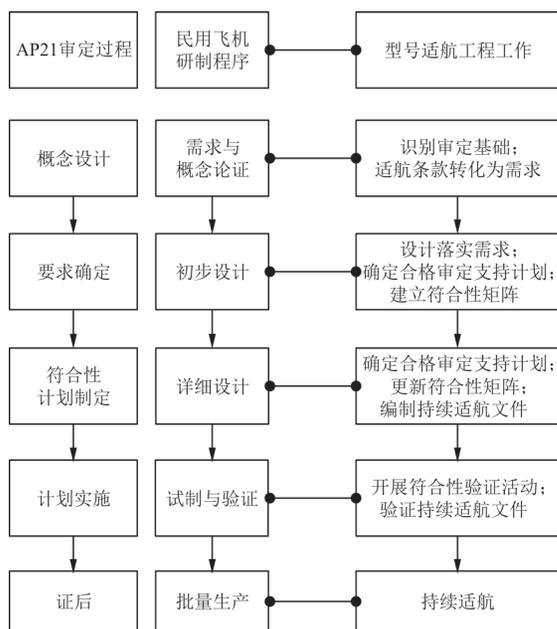


图2 型号适航工作流程

Fig. 2 Type airworthiness workflow

## 4 结论

本文以某型 RAT 系统为例,阐述了民用飞机 RAT 系统适航工程技术工作流程与方法:

- (1) 首先识别适航审定基础;
- (2) 确认条款提出的需求并落实到产品设计;
- (3) 确定条款符合性方法并实施符合性验证;
- (4) 开展持续适航工作(由于目前国内 RAT 系统实际取证的型号极少,本文暂未阐述持续适航工作相关内容)。

本文提出的适航工程技术工作流程已随着某型民用飞机的 RAT 系统研制进行了初步验证,后续还将通过更多型号应用和取证工作对这一流程和知识成果进行更新迭代,进而将民用飞机 RAT 系统适航工程的工作流程及知识成果固化下来,指导国内 RAT 系统的正向研制及取证工作,并反哺适航管理体系的建设,为管理体系的建设提供项目实践参考。

### 参考文献

- [1] 赵越让. 适航理念与原则[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013: 1-6.  
ZHAO Yuerang. The concept and principle of airworthiness [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013: 1-6. (in Chinese)
- [2] 夏卿, 顾玲燕, 李旺波. 航空机电系统及供应商适航能力建设思考[J]. 航空机电, 2020(2): 1-6.  
XIA Qing, GU Lingyan, LI Wangbo. Thoughts on airworthiness capability construction of aviation electromechanical system and suppliers [J]. Aviation Electromechanics, 2020 (2): 1-6. (in Chinese)
- [3] 田莉蓉. 机载电子产品适航工程方法[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016: 1-5.  
TIAN Lirong. Airworthiness engineering method of airborne electronic products [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016: 1-5. (in Chinese)
- [4] 张翔伦, 李哲. 基于适航标准的飞控系统设计要求分析[J]. 航空标准化与质量, 2008(3): 23-25.  
ZHANG Xianglun, LI Zhe. Analysis of flight control system design requirements based on airworthiness standards [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2008 (3): 23-25. (in Chinese)
- [5] 宋成艳. 23部飞机综合模块化航电系统适航验证方法研究[C]// 2017(第六届)民用飞机航电国际论坛. 上海: 中国航空学会, 2017: 11-14.  
SONG Chengyan. Research on airworthiness verification method of CCAR 23 aircraft integrated modular avionics system [C]// 2017 (6th) Civil Avionics International Forum. Shanghai: CSAA, 2017: 11-14. (in Chinese)
- [6] 辜迎佳, 吴斌. 民机航电系统适航研制中的问题与思考[C]// 2017(第六届)民用飞机航电国际论坛. 上海: 中国航空学会, 2017: 504-508.  
GU Yingjia, WU Bin. Problems and thoughts in airworthi-

- ness development of civil aircraft avionics system[C]// 2017 (6th) Civil Avionics International Forum. Shanghai: CSAA, 2017: 504-508. (in Chinese)
- [7] 李哲, 张浩驰, 王辉, 等. 民用机载系统与设备适航取证研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(12): 30-37.  
LI Zhe, ZHANG Haochi, WANG Hui, et al. A study on airworthiness of civil airborne systems and equipment [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(12): 30-37. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] INCOSE. 系统工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 52-63.  
INCOSE. Systems engineering handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 52-63. (in Chinese)
- [10] FAA. Industry documents to support aircraft lightning protection certification: AC20-155A[S]. US: FAA, 2013.
- [11] EASA. Lightning protection: AMC 25.581[S]. US: EASA, 2013.
- [12] AerospaceSAE. Aircraft lightning zoning: SAE ARP 5414 [S]. US: SAE, 2005.
- [13] AerospaceSAE. Aircraft lightning environment and related test waveforms: SAE ARP 5412[S]. US: SAE, 2013.
- [14] AerospaceSAE. Aircraft lightning testing methods: SAE ARP 5416[S]. US: SAE, 2013.
- [15] AerospaceSAE. Aircraft lightning direct effects certification: SAE ARP 5577[S]. US: SAE, 2002.
- [16] RTCA. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment: RTCA/DO-60G [S]. US: RTCA, 2010.
- [17] MIL. Lightning qualification test techniques for aerospace vehicles and hardware: MIL-STD-1757A[S]. US: MIL, 1993.
- [18] 中国航空工业部. 飞机雷电防护要求及试验方法: HB 6129—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.  
Ministry of Aviation Industry of China. Requirements and test methods for aircraft lightning protection: HB 6129—1987[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987. (in Chinese)
- [19] 中国航空航天工业部. 民用飞机雷电防护及搭接设计指南: HB/Z 185—1990[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.  
Ministry of Aerospace Industry of China. Guide for lightning protection and lap joint design of civil aircraft: HB/Z 185—1990[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990. (in Chinese)
- [20] 中国民用航空局航空器适航审定司. 航空器型号合格审定程序: AP-21-AA-2011-03-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011: 21-61.  
Aircraft Airworthiness Certification Department of CAAC. Aircraft type certification procedure: AP-21-AA-2011-03-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011: 21-61. (in Chinese)
- [21] 中国航空工业集团有限公司. 民用飞机研制程序: HB 8525—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 40-42.  
The Aviation Industry Corporation of China. Civil aircraft development procedure: HB 8525—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 40-42. (in Chinese)

#### 作者简介:

李 焕(1994—),女,硕士,工程师。主要研究方向:冲压空气涡轮适航工程技术、收放作动器设计与仿真等。

邵小铃(1964—),男,学士,研究员。主要研究方向:传动、液压、控制,涵盖恒速传动装置、液压马达、冲压空气涡轮等。

夏 卿(1975—),女,博士,高级工程师。主要研究方向:适航、民用飞机研发体系等。

(编辑:马文静)

(上接第90页)

- [13] 任建勋. 空气螺旋桨逆向建模[J]. 机械工程师, 2014(6): 132-133.  
REN Jianxun. Reverse modeling of air propeller [J]. Mechanical Engineer, 2014(6): 132-133. (in Chinese)
- [14] 王继群. 基于无动力排风扇叶片曲面的逆向设计及关键技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2009.  
WANG Jiqun. Research on reverse design and key technology based on unpowered exhaust fan blade curved surface [D]. Beijing: North China University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [15] 刘远强, 项松, 佟刚, 等. 某电动飞机螺旋桨气动特性数值模拟与风洞试验[J]. 飞行力学, 2017, 35(3): 81-84.  
LIU Yuanqiang, XIANG Song, TONG Gang, et al. Numerical simulation and wind tunnel test of aerodynamic characteristics of an electric aircraft propeller [J]. Flight Dynamics, 2017, 35(3): 81-84. (in Chinese)
- [16] 王裕夫, 刘振国, 陶国权. 某高空螺旋桨气动特性数值模拟与风洞试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(8): 1102-1105.  
WANG Yufu, LIU Zhenguo, TAO Guoquan. Numerical simulation of high altitude propeller's aerodynamic characteristics and wind tunnel test [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(8): 1102-1105. (in Chinese)

#### 作者简介:

邱辉壮(1997—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器总体与结构设计。

江善元(1965—),男,硕士,教授。主要研究方向:飞行器总体与结构设计。

钟伯文(1963—),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器总体与气动设计。

(编辑:丛艳娟)