http：//myfj. cnjournals. com　myfj_sadri@163. com　(021)20866796

DOI：10. 19416/j. cnki. 1674-9804. 2024. 03. 017

民用飞机机轮电滑行系统适航符合性验证技术研究

赵　珊*　陈国慧　张　娟　马晓军　赵文庆

(西安航空制动科技有限公司,西安 710075)

摘　要：飞机电滑行系统是一种民用飞机滑行领域出现的新兴技术,具有较为重要的现实意义和潜在应用价值,为保证研制过程中适航性工作的全面落实,需提高飞机电滑行系统的适航安全性。为了全面研究民用飞机电滑行系统的适航符合性,针对电滑行系统的组成和特点,对系统级和机轮刹车滑行装置的适航标准、符合性验证方法进行了分析,结合 CCAR 25. 307 结构符合性条款的解读,给出了民用飞机电滑行系统验证的适航要求。引入系统工程“V”模型至民用飞机电驱动系统适航符合性验证过程,利用系统工程“V”模型提出了适用于飞机电滑行系统的验证流程,明确了各阶段工作内容,形成了适用于飞机电滑行系统的适航符合性试验验证方法和验证思路,为民用飞机电滑行系统的设计和适航提供参考。

关键词：民用飞机电滑行系统;适航符合性;审定基础;符合性方法;系统工程

中图分类号：V219　　**文献标识码**：A　　**OSID**：

0　引言

随着“多电飞机”向“全电飞机”的发展,飞机电滑行系统的应用越来越广泛[1-4]。当前民用飞机从停机坪滑行至起飞线并从跑道滑行至停机坪和廊桥都是由主发动机提供动力,此时的发动机处于慢车位,其燃油消耗和尾气排放较大,导致飞机经济性和环保性降低[5]。电滑行系统技术作为一种民用飞机滑行领域出现的新兴技术,开展民用飞机地面自主驱动、电驱动技术研究,对于提高飞机运营效率、延长发动机使用寿命、降低能源消耗、降低环境污染等方面具有较为重要的现实意义和潜在应用价值。

目前,国内外对飞机电滑行系统的研究主要集中在燃油消耗、功率消耗、成本分析和环保效益方面[4-6],而对于电驱动系统适航技术研究较少。因此随着我国大型客机项目的开展,为满足飞机电驱动系统适航技术方面的需要,本文对飞机电驱动系统适航技术进行分析和研究,并结合有关的适航规章等文件,对适航需求进行设计追溯,利用系统工程“V”模型确定飞机电滑行系统的适航性要求、验证方法,保证研制过程中适航性工作的全面落实,从而提高飞机电滑行系统的适航安全性。

1　电驱动系统组成

系统的组成是识别审定基础、开展适航工程活动的前提。电驱动系统主要由辅助动力装置(auxiliary power unit,简称 APU)、综合控制器、电机控制器、电驱动装置、控制操纵手柄、机轮数据集中器等组成[7-8]。

飞行员打开驾驶舱内 APU 发电机,将控制操纵手柄放置于前进挡位或者后退档位,综合控制器接受到控制操纵手柄发出的指令后,转换为电控制信号,发送到电机控制器控制电驱动装置带动齿轮运动,以实现飞机方向和速度的功能控制[9]。

* **通信作者**. E-mail：18292905008@163. com

引用格式：赵珊,陈国慧,张娟,等. 民用飞机机轮电滑行系统适航符合性验证技术研究[J]. 民用飞机设计与研究,2024(3):112-116. ZHAO S, CHEN G H, ZHANG J,et al. Research on airworthiness compliance verification method of civil aircraft electric taxiing system[J]. Civil Aircraft Design and Research,2024(3):112-116(in Chinese).

2　适航审定基础研究

依据飞机电滑行系统架构,以及 CCAR-25-R4《运输类飞机适航标准》和 CTSO-C135a《运输类飞机机轮和机轮刹车装置》规定的功能、性能、强度、电气、电子设备、电磁兼容性、EWIS 系统、环境适应性、安全性等适航性要求,对飞机电滑行系统的审定基础进行识别和确认,分为系统级审定基础和机轮刹车驱动装置的审定基础。

CCAR-25-R4 是运输类飞机研制中必须满足的最低安全标准,对飞机电滑行系统级审定基础进行识别和确认,对系统的操作性、功能、安装及安全性提出了通用的要求。CTSO-C135a 是专门针对民用运输类飞机和刹车装置组件所必须满足 CTSO 标记的最低性能标准。

本文对 CCAR-25-R4 中机轮刹车驱动装置适航审定基础和验证方法相关条款进行详细叙述,如表 1 所示。

表 1　机轮刹车驱动装置审定基础(CCAR-25-R4 条款)

序号	条　款	MC	符合性验证方法
1	CCAR 25.301(a)(c)	1	产品规范、设计图纸
2	CCAR 25.303	1	产品规范、设计图纸
3	CCAR 25.305(a)(b)	1、2、4	设计图纸、强度计算报告、径侧向联合试验、过压和屈服试验
4	CCAR 25.307	1、4	设计图纸、径向载荷试验报告、径-侧向联合载荷试验、机轮过压试验、刹车装置屈服和过压试验
5	CCAR 25.601	1	设计图纸
6	CCAR 25.603	1	设计图纸
7	CCAR 25.605	1	设计图纸、工艺规程
8	CCAR 25.609(a)(b)	4	设计图纸、环境试验报告
9	CCAR 25.731(a)(b)(c)(d)(e)	1	产品规范、性能计算报告、技术协议书
10	CCAR 25.735(a)(d)(f)(g)(i)(j)(k)	1、4	产品规范、设计图纸、动力试验
11	CCAR 25.1301(a)	1、4	产品规范、设计图纸、动力试验报告
12	CCAR 25.1309(a)(b)	1、4	设计图纸、可靠性分析报告
13	CCAR 25.1431(a)(c)(d)	1	设计图纸、电滑行系统电磁兼容试验报告、电源特性试验报告
14	CCAR 25.1501	1	使用维护说明书、维修手册
15	CCAR 25.1529	1	使用维护说明书、维修手册
16	CCAR 25.1541	1	设计图纸

3　适航符合性验证方法

3.1　符合性验证思路

以审定基础为研究对象,遵循系统工程思想,用“V”模型梳理飞机电滑行系统研制过程,如图 1 所示,对系统级和机轮刹车级适航要求逐层分解、逐层确认、逐层验证:从需求定义到设计贯彻的确认,从设计贯彻到适航性审查的验证[10]。对飞机电滑行系统研制流程中的关键点进行控制,形成飞机电滑行系统的适航符合性设计与验证流程、设计准则、设计方法,构建飞机电滑行系统适用的符合性验证方法,有效保证了整个适航符合性验证过程全面可靠。

3.1.1　需求定义阶段

“V”模型左侧表示自上向下的设计过程,对应需求的分解和定义过程[11]。识别、分配、传递、确认飞机级适航条款级需求至系统、机轮刹车级适航需求,确保适航条款要求在研制总要求和系统、部件级设计要求中得到正确、完整地落实,确定系统的架构模型,将系统的各项功能分配到负责实现该功能的系统、子系统、部件,建立系统的功能架构。

通过编制合格审定基础和合格审定支持计划

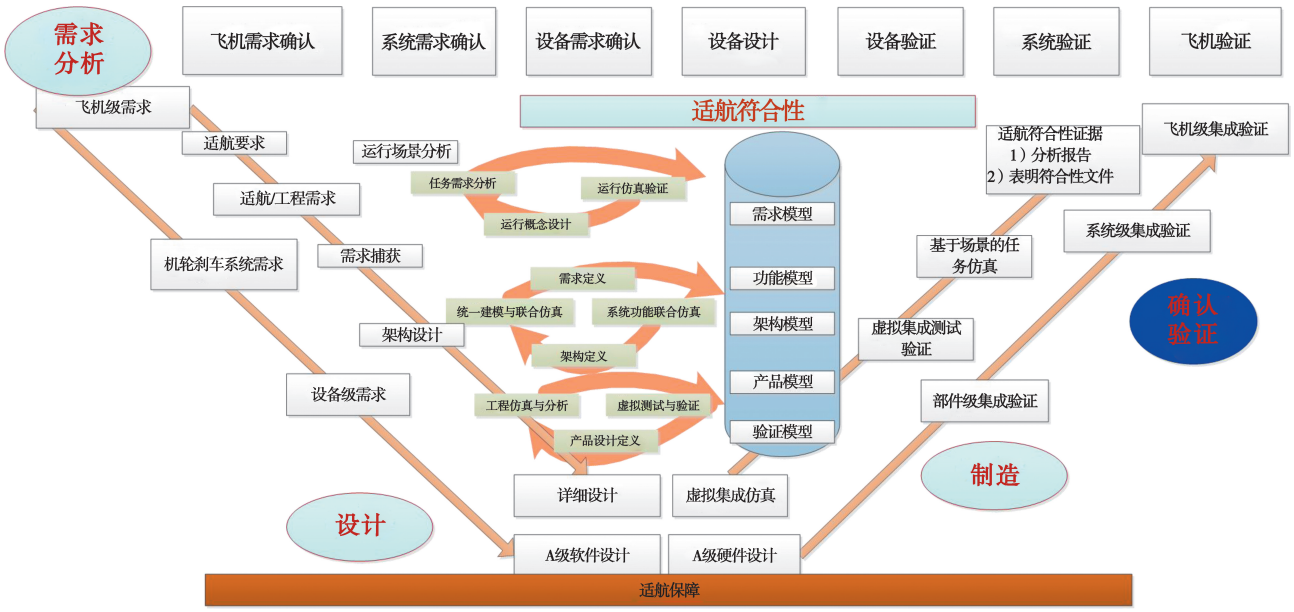

图 1　电滑行研制过程模型

(certification support plan,简称 CSP)对适航验证项目进行确定,开展各阶段设计评审,完成各阶段设计保证大纲、产品规范等资料编制。

此阶段通过对民用飞机电滑行系统开展安全性、维修性、经济性、安装布置、重量边界等设计要素的分析,完成顶层设计需求捕获和需求确认,最终完成了民用飞机电滑行系统的飞机级需求分析。

3.1.2　需求验证阶段

“V”模型右侧表示自下向上的整合过程,对应于系统的综合和验证过程[10]。此过程的作用是确保需求的正确性和完整性,保证各层需求与产品之间的一致性。对适航需求的验证与确认是为了满足适航法规提出的对民用航空产品安全性的要求。验证与确认通常是贯穿整个研制周期的阶段性过程。在每个阶段,验证和确认活动使得需求的完整性和正确性的置信度不断提升[11]。

主要验证方法包括:评审、分析、试验及使用经验等,结构化记录的验证程序和验证结果用以表明追溯验证过程的状态,逐步形成完整的技术需求集,成为相应的解决方案的输入和约束[12],形成飞机/系统/设备级设计描述文档、详细的接口描述文档、系统级安全性分析报告、PASA/PSSA 安全性评估报告、各研制阶段评审报告、鉴定试验大纲、试验报告等。

开展特种工艺鉴定对材料规范和工艺规范进行验证,进行制造符合性检查,目击试验,确定适航符合性验证工作,并在右侧适航验证试验中一一验证,最终形成需求关闭及设计闭环。

3.2　符合性验证

针对审定基础,根据适航条款的具体要求可选择其中的一种或多种符合性方法的组合方式来满足适航条款的要求。以 CCAR25.307 结构符合性的证明条款为例,适航条款要求结构设计以及在各工况临界载荷下的强度和刚度的符合性证明,满足强度和刚度的变形要求。对机轮刹车装置进行径向载荷试验、径-侧向联合载荷试验、机轮过压试验、刹车装置屈服和过压试验,考核其在各种工况下的结构符合性。

本文选取驱动装置齿圈这一结构,齿圈在机轮交变载荷作用下发生弹性变形,影响齿轮啮合精度和传动效率,因此对驱动装置齿圈进行结构分析及强度、刚度仿真和计算是非常关键的。齿圈材料选用 TM210A,硬度为 HRC = 51,$\sigma_{0.2}$ = 1 940 MPa,σ_b = 2 040 MPa。

通过有限元分析,在各工况中选取最严酷工作工况,对该工况下进行强度、刚度分析,齿圈工作应力云图、应力位移云图如图 2 和图 3 所示。从云图中可看出最严酷工况下,齿尖部位最大变形为 0.314 6 mm,小于设计最大要求值;齿圈疲劳最大应力位于齿尖处 816.6 MPa,小于材料许用应力,满足

刚度和强度要求,不影响齿轮啮合精度和传动效率。

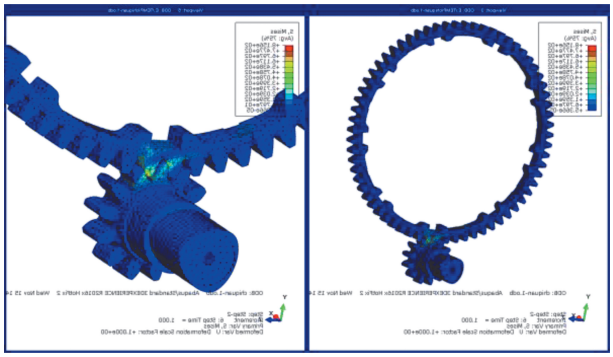

图 2　齿圈工作应力云图

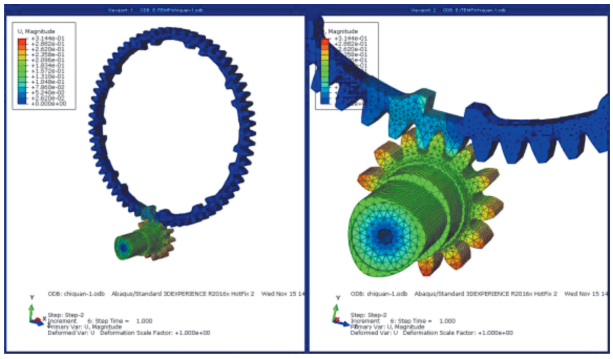

图 3　齿圈工作应力位移云图

4　结论

本文通过对电滑行系统研制过程适航符合性验证技术的研究,阐述了飞机电滑行系统的组成和工作原理等。以 CCAR25.307 结构符合性的证明为例,系统说明了关于条款、符合性验证方法、符合性思路、符合性文件的需求矩阵研究方法。确保适航需求落实到设计中,最终形成需求关闭及设计闭环,并利用系统工程“V”模型提出了适用于飞机电滑行系统的验证流程,详细说明了飞机电滑行系统研制各阶段所开展的工作,形成了适用于飞机电滑行系统的适航符合性试验验证方法和验证思路,本文可为民用绿色电滑行系统适航取证工作提供指导。

参考文献:

[1] FRANK C, DURAND J G, LEVY W, et al. Design of an improved green taxiing system focused around the landing gear[C]//14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, GA: AIAA, 2014: 925-928.

[2] CHAKRABORTY I, MAVRIS D N, EMENETH M, et al. An integrated approach to vehicle and subsystem sizing and analysis for novel subsystem architectures[J]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G. Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(G3): 496-514.

[3] GANEV E D, CHIANG C Y, FIZER L, et al. Electric drives for electric green taxiing systems[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2016(9): 62-73.

[4] 陈国慧,张博强,陆峰,等. 基于模型的飞机电滑行系统设计与研究[J]. 测控技术,2020,39(10):24-31.

[5] GUO R, ZHANG Y, WANG Q. Comparison of emerging ground propulsion systems for electrified aircraft taxi operations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 44: 98-109.

[6] 张威,李开伟,王伟,等. 飞机电动机轮设计及电动滑行系统仿真研究[J]. 中国机械工程,2018,29(13):1547-1552.

[7] 苏静,李胜军. 飞机绿色电滑行研究概述[C]//中国航空学会. 2017 年(第三届)中国航空科学技术大会论文集. 北京:中国科学技术出版社,2017:244-248.

[8] 李开伟. 飞机地面电动滑行系统性能研究[D]. 天津: 中国民航大学,2018.

[9] HEINRICH M T E, KELCH F, MAGNE P, et al. Regenerative braking capability analysis of an electric taxiing system for a single aisle midsize aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 298-307.

[10] 曾海军. 民用航空发动机风扇叶片适航符合性设计与验证方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2014.

[11] 丁亚. 基于系统工程方法的无人机族系统总体设计[D]. 南京: 南京航空航天大学,2019.

[12] 蔡彬,汤勇. 基于 4754A 及设计保证要求的发动机研发适航需求管理[J]. 科技资讯,2018,16(7):84-86.

[13] 卢艺,郝莲,李承立. 基于构型项目分类的民机系统适航符合性证据体系结构研究[J]. 民用飞机设计与研究,2017,(3):26-30,4.

作者简介

赵　珊　女,本科,工程师。主要研究方向:民用飞机机轮刹车与适航技术。E-mail: 18292905008@163.com

陈国慧　女,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机机轮刹车与适航技术。E-mail: nuaacgh@163.com

张　娟　女,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机机轮刹车与适航技术。E-mail: nuaacgh@163.com

马晓军 男,硕士,研究员。主要研究方向:民用飞机机轮刹车与适航技术。E-mail:nuaacgh@163.com

赵文庆 男,硕士,研究员。主要研究方向:民用飞机机轮刹车与适航技术。E-mail:nuaacgh@163.com

Research on airworthiness compliance verification method of civil aircraft electric taxiing system

ZHAO Shan * CHEN Guohui ZHANG Juan MA Xiaojun ZHAO Wenqing

(Xi'an Brake Technology Co, Ltd, Xi'an 710075, China)

Abstract: Aircraft electric taxiing system is an emerging technology in the field of civil aircraft taxiing, which has important practical significance and potential application value. To ensure the full implementation of airworthiness in the development process, it is necessary to improve the airworthiness safety of aircraft electric taxiing system. In order to comprehensively study the airworthiness compliance of the electric taxiing system of civil aircraft, based on the composition and characteristics of the electric taxiing system, the airworthiness standards and compliance verification methods of the system level and wheel brake drive device are analyzed. Combined with the interpretation of the requirements of the structural compliance clause CCAR 25.307, the airworthiness requirements for the verification of the electric taxiing system of civil aircraft are given. The system engineering V model is introduced into the airworthiness compliance verification process of the civil aircraft electric drive system, and the verification process suitable for the aircraft electrical taxi system is proposed by using the system engineering V model, the work content of each stage is defined, and the airworthiness compliance test verification method and verification idea suitable for the aircraft electrical taxi system are formed. It provides a reference for the design and airworthiness of civil aircraft electric taxiing system.

Keywords: civil aircraft electric taxiing system; airworthiness compliance; type certification; compliance methods; system engine

* Corresponding author. E-mail: 18292905008@163.com