

# 民用飞机着陆载荷第 25.473 条款要求及符合性验证研究

刘文斌\*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

## 摘要:

《中国民用航空规章第 25 部:运输类飞机适航标准》(CCAR-25)第 25.473 条,对民用飞机地面载荷的着陆情况计算进行了规定。对其具体内容和符合性验证方法进行研究,包括条款与其它相关条款的约束关系、可接受的符合性方法,以及着陆载荷计算涉及的着陆重量、下沉速度、着陆姿态等所有工况和工况参数的确定方法,还有起落架动态特性、轮胎摩擦系数的符合方法研究等,为民用飞机着陆地面载荷的设计和符合性验证提供参考。

关键词:适航;符合性方法;地面载荷;着陆;起落架

中图分类号:V221.91

文献标识码:A

OSID:



## 0 引言

飞机地面载荷设计的内容包括滑跑、转弯、刹车等地面操纵载荷,以及着陆情况载荷两部分,其中着陆载荷需要使用动力学分析方法,从而考虑飞机和起落架的动态特性,还需要进行起落架落震试验<sup>[1]</sup>和仿真进行辅助分析,工作难度更大。

民用飞机基于严格的安全性要求和适航理念的发展,对着陆载荷的计算情况进行了详细的要求和假定。CCAR-25 是中国民用飞机设计必须满足的最低要求,其中第 25.473 条规定着陆载荷的相关内容,包括姿态、重量构型、下沉速度、升力、摩擦系数等,需要进行严谨的分析后,才能开展飞机设计和符合性验证工作。

目前,国内外对适航领域研究的论文文献都不少<sup>[2-5]</sup>,但在国内,因为民机发展并不突出的现实情况,地面载荷相关的适航研究并不多。随着国内民机产业的蓬勃发展,如何以适航的理念研究清楚该条款要求,从而顺利进行符合性设计和验证活动,具

有重大价值。本文将对规定着陆载荷计算的 CCAR-25 部 R4 版第 25.473 条款进行研究,包括条款要求解析、与其它条款的关系、符合性方法、审查要点和民机案例等,可以为中国民用飞机着陆载荷设计提供参考。

## 1 适航条款内容

《中国民用航空规章第 25 部:运输类飞机适航标准》第 25.473 条“着陆载荷情况和假定”的内容为<sup>[6]</sup>:

(a)对于第 25.479 条至第 25.485 条中规定的着陆情况,假定飞机按下列情况接地:

(1)以第 25.479 条和第 25.481 条中定义的姿态;

(2)设计着陆重量(以最大下沉速度着陆情况中的最大重量)时的限制下沉速度为 3.05 m/s (10 ft/s);

(3)设计起飞重量(以减小的下沉速度着陆情况中的最大重量)时的限制下沉速度为 1.83 m/s

\* 通信作者. E-mail: liuwenbin@comac.cc

引用格式:刘文斌.民用飞机着陆载荷第 25.473 条款要求及符合性验证研究[J].民用飞机设计与研究,2020(2):34-38.

LIU W B. Study on requirements and verification of CCAR 25.473 for civil airplane landing loads[J]. Civil Aircraft Design and Research,2020(2):34-38(in Chinese).

(6 ft/s);

(4) 如果能表明飞机具有不能达到上述的下沉速度的设计特征,可以修改此下沉速度。

(b) 除系统或程序显著影响升力外,可假定飞机升力不超过飞机重力。

(c) 飞机和起落架载荷的分析方法至少应考虑下列要素:

- (1) 起落架动态特性;
- (2) 起旋和回弹;
- (3) 刚体响应;
- (4) 机体结构动态响应(若显著)。

(d) 起落架动态特性必须按第 25.723(a) 条中确定的试验来验证。

(e) 可以通过考虑滑行速度和轮胎压力的效应来确定轮胎与地面之间的摩擦系数,此摩擦系数不必大于 0.8。

## 2 相关条款和关系

根据第 25.473 条款内容,与其相关条款包括:第 25.471 条、第 25.479 条~485 条、第 25.723 条。条款的名称和根据描述整理的条款间的相关性,见表 1、表 2。

表 1 第 25.473 条相关条款

相关条款	相关条款名称
第 25.471 条	地面载荷-总则
第 25.479 条	水平着陆情况
第 25.481 条	尾沉着陆情况
第 25.483 条	单起落架着陆情况
第 25.485 条	侧向载荷情况
第 25.723 条	起落架-减震试验

表 2 第 25.473 条相关条款的相关性

相关条款	与第 25.473 条的相关性
第 25.471 条	第 25.471 条为该条款的总则性条款
第 25.479 条 至 第 25.485 条	第 25.479 条至第 25.485 条为第 25.473 条的着陆情况定义了具体姿态、水平速度、航向和侧向载荷计算等要求
第 25.723 条	第 25.723 条为第 25.473 条的起落架动态特性规定了具体试验要求

## 3 适航条款要求解析

第 25.473(a) 款:说明了第 25.479 条至第 25.485 条规定的载荷情况都是着陆情况,必须考虑飞机的姿态、飞机设计重量和相应的下沉速度。

第 25.473(a)(1) 款:对着陆情况进行了规定和说明,依据飞机的受载特点对着陆情况分为对称着陆和非对称着陆,对称着陆又根据着陆姿态分为水平着陆和尾沉着陆。第 25.479 条规定了水平着陆情况,以及非对称的侧偏着陆情况;第 25.481 条规定了尾沉着陆情况;第 25.483 条和第 25.485 条分别规定了单轮着陆情况和侧向载荷情况两种非对称着陆情况。

第 25.473(a)(2) 款:对着陆重量和下沉速度进行了规定,应计算设计着陆重量(以最大下沉速度着陆情况中的最大重量)在下沉速度为 3.05 m/s (10 ft/s) 情况的着陆载荷。

第 25.473(a)(3) 款:对着陆重量和下沉速度进行了规定,应计算设计起飞重量(以减小的下沉速度着陆情况中的最大重量)在限制下沉速度为 1.83 m/s (6 ft/s) 情况的着陆载荷。

第 25.473(a)(4) 款:对特殊设计飞机的下沉速度进行了补充说明,即如果能表明飞机具有不能达到上述规定的下沉速度的设计特征,譬如着陆情况的下沉速度设计指标或驾驶员手册等证明材料,允许修改(a)(2)和(a)(3)规定的下沉速度。

第 25.473(b) 款:规定了在整个着陆撞击过程中,飞机升力不超过飞机重量,升力可通过详细计算和试验获得,或采用升力等于重力的边界情况。

第 25.473(c) 款:规定了采用分析方法计算着陆载荷时应考虑的要求。

第 25.473(c)(1) 款:应考虑起落架动态因素,包括起落架的刚度特性、缓冲器内部的空气弹簧力和阻尼力、轮胎压缩性能和摩擦性能等。

第 25.473(c)(2) 款:应考虑起落架的起旋和回弹情况,即需要考虑起落架的起旋时刻载荷和回弹时刻载荷<sup>[7]</sup>,这两个时刻是着陆过程中起落架航向载荷的两个边界情况。

第 25.473(c)(3) 款:应考虑刚体响应,是指需要考虑重要集中质量分布的影响,比如起落架动力学分析中需要考虑活塞杆、扭力臂、机轮构成的非弹性质量<sup>[8]</sup>。

第 25.473(c)(4) 款:如果机体柔性对着陆载荷的影响“显著”<sup>[9]</sup>,则需考虑该影响,否则使用刚性机体假设。显著与否的确定,可根据国内外相似型号经验,或者试验和试飞数据决定。

第 25.473(d) 款:规定用于着陆载荷计算的起落架动态特性,必须按第 25.723(a) 款中确定的减震试验来验证。

第 25.473(e) 款:规定了起落架轮胎与地面之间的摩擦系数确定方法,此摩擦系数不必大于 0.8。

## 4 符合性验证思路

### 4.1 符合性方法表

第 25.473 条是关于着陆载荷的总则性条款,应通过载荷分析/计算(MOC2)、试验室试验(MOC4)来验证。

针对 25.473 条的符合性验证方法见表 3,各项具体的验证工作如下。

表 3 符合性方法表

条款号	专业	符合性方法									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25.473	载荷			2		4					

### 4.2 MOC2

对第 25.473 条,采用载荷计算分析表明符合性。在着陆载荷计算中,分别考虑最大着陆重量、最大起飞重量下的水平着陆情况、尾沉着陆情况、单起落架着陆情况、侧向载荷情况。对应最大着陆重量的限制下沉速度为 3.05 m/s,对应最大起飞重量的限制下沉速度为 1.83 m/s。借助于运动学和动力学的方法来建立起落架触地后的撞击模型和运动微分方程,再根据初始条件及缓冲特性去求解这些方程,得到前、主起落架垂直载荷、起旋载荷和回弹载荷,再分别进行刚性机体着陆载荷计算和弹性机体着陆动响应分析。在整个着陆过程中,除系统或程序显著影响升力外,假定飞机升力不超过飞机重力。轮胎与跑道间的地面摩擦系数由轮胎滑移比曲线确定,地面摩擦最大系数不超过 0.8。

### 4.3 MOC4

对第 25.473 条,按第 25.723(a) 款中规定开展减震试验,验证起落架的动态特性,以表明符合性。试验应要考虑前、主起落架使用场景的差别,对不同的着陆姿态(水平和尾沉)、下沉速度(1.83 m/s 和

3.05 m/s)和水平速度进行组合,选取设计着陆重量或设计起飞重量中产生较大着陆冲击能量的重量状态,设定合理的试验工况。阻力载荷的模拟与水平速度严格相关,应在飞机着陆载荷分析的使用的水平速度中选取。最后,还需进行下沉速度 3.66 m/s 的储备能量吸收试验,来验证起落架的吸能特性。

## 5 某型民机案例

### 5.1 MOC2 案例

某型民机通过不同参数组合的工况设置,以满足 25.473(a) 条款对重量、下沉速度、姿态要求,并编制着陆载荷计算报告作为符合性验证材料,以验证着陆载荷符合性。供动态仿真使用的工况参数见表 4, 25.473(a)(4) 对下沉速度的补充要求自动满足。

表 4 工况参数表

重量构型	下沉速度(m/s)	姿态
最大起飞重量	1.83	三点水平
		两点水平
最大着陆重量	3.05	尾沉着陆

通过建立合理的载荷分析/计算模型,以符合 25.473(b) 和(c) 条款的要求。先建立起落架着陆仿真分析模型,进行起落架载荷计算,再进行机体载荷的计算。模型中对机体采用刚体假设,起落架的物理模型<sup>[10]</sup>如图 1 所示,数学模型参考《飞机设计手册》。模型中考虑了飞机升力、刚体响应、起落架刚度、缓冲器性能、轮胎压缩和摩擦性能等因素,并通过编写计算程序实现具体计算。落震仿真模型建模报告、着陆载荷计算程序手册,作为符合性材料供局方审定,以验证条款的符合性。

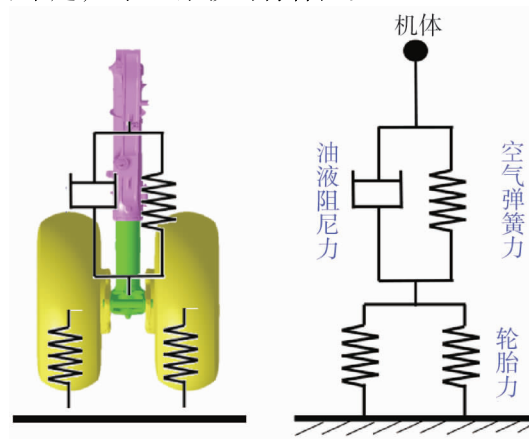


图 1 起落架力学特性示意

采用如图 2 所示的滑移比<sup>[10]</sup>和轮胎摩擦系数曲线,以满足 25.473(e)的要求。

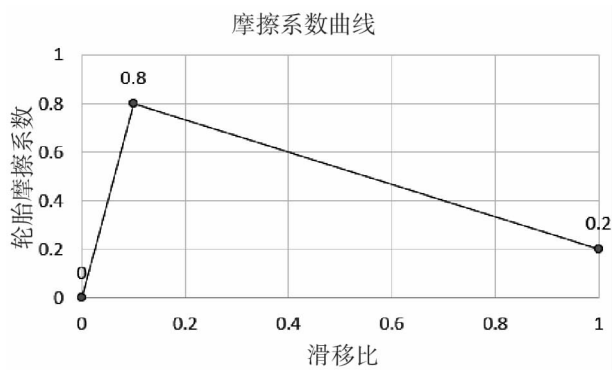


图 2 滑移比和摩擦系数曲线

## 5.2 MOC4 案例

某型民机按照 25.723(a)条款要求,开展前、主落震试验以满足 25.473(d)条款,落震试验的工况从着陆仿真工况中选择冲击能量较大的工况,试验的设计应具备姿态调整、载荷测量、升力模拟、重量调整等功能。试验前后和开展过程中,编制试验大纲、试验报告、落震试验模型验证等文件,并邀请局方代表参与试验目击。某型民机主起落架落震试验的现场照片如图 3 所示。



图 3 某型民机起落架落震试验照片

## 6 结论

本文研究了运输类飞机适航标准第 25.473 条中各项的要求,对条款内容进行了逐条解析,梳理了符合性验证思路,并给出了某型民机着陆载荷的计算和符合性验证案例,可为民机着陆载荷设计提供参考。

### 参考文献:

- [1] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册:起飞着陆系统设计[M]. 北京:航空工业出版社,2002:56-59.
- [2] 聂宏,魏小辉. 大型民用飞机起落架关键技术[J]. 南京航空航天大学学报,2008.
- [3] 王俊彪,晏祥斌,蒋建军,等. 民机适航管理体系分析及其发展浅议[J]. 机械设计与制造工程,2014(4):1-5.
- [4] XU Haojun, LIU Dongliang, XUE Yuan, etc. Airworthiness Compliance Verification Method Based on Simulation of Complex System[J]. Chinese Journal of Aeronautics. 2012(25):681-690.
- [5] BUDERATH M. . A Certifiable Framework for Health Monitoring and Management[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2017(34):229-246.
- [6] 中国民用航空规章编委会. 中国民用航空规章第 25 部:运输类飞机适航标准[M]. 2009:43.
- [7] 史海文,张大千. 在落震试验中起转和回弹载荷的模拟情况对试验结果的影响[J]. 航空学报,2001,22(1):39-41.
- [8] 陈玉红,郑华,何泳,等. 含气穴效应的起落架落震动力学研究[J]. 南京航空航天大学学报,2015,47(4):602-606.
- [9] 张明. 飞机地面动力学若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
- [10] 顾宏斌. 飞机地面运行的动力学模型[J]. 航空学报,2001,22(2):163-167.

### 作者简介

刘文斌 男,硕士,工程师。主要研究方向:起落架设计与分析。E-mail: liuwenbin@comac.cc

## Study on requirements and verification of CCAR 25.473 for civil airplane landing loads

LIU Wenbin \*

(Shanghai Aircraft Design and Research Institution, Shanghai, 201210)

**Abstract:** It is required by item 25.473 in CCAR-25 that the civil airplane landing loads design shall meet a series of requirements and assumptions. This paper has studied its content and corresponding verification method, including relations with other airworthiness requirements, acceptable verification methods, and how to select the important calculation input data, such as landing weight, drop velocity, landing attitude and loads cases, landing gear dynamic properties and friction factor. The results will contribute to the design and compliance activities for transport category airplanes landing loads.

**Keywords:** airworthiness; method of compliance (MOC); ground loads; landing; landing gear

---

\* Corresponding author. E-mail: liuwenbin@comac.cc