

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-06

# 某型飞机主起落架收放系统性能分析与试验验证

刘磊<sup>1</sup>, 刘成龙<sup>1</sup>, 姚雄华<sup>1</sup>, 印寅<sup>2</sup>

(1. 航空工业第一飞机设计研究院 结构设计研究所, 西安 710089)

(2. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 起落架收放系统是一个集合了机械、电气、液压的混合复杂系统, 随着仿真技术的发展, 通过计算机仿真的方式进行收放系统性能研究既直观快捷, 又可以降低成本。但是, 目前利用单个软件对起落架收放系统这类复杂系统进行仿真较难实现, 针对该问题, 提出一种结合理论分析、多学科仿真技术分析的方法, 首先依据起落架模型收放原理, 建立收放系统机械动力学模型; 然后依据液压原理建立液压系统仿真模型, 在此基础上构建二者结合的多学科协同仿真模型; 最后将多种工况设置下进行的联合仿真结果与试验结果比对, 验证了联合仿真技术在起落架收放系统分析中应用的准确性和便利性。

**关键词:** 起落架; 收放系统; 动力学; 联合仿真; 试验

中图分类号: V226

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## Performance analysis and experimental verification of the main landing gear retraction system of a certain type of aircraft

LIU Lei<sup>1</sup>, LIU Chenglong<sup>1</sup>, YAO Xionghua<sup>1</sup>, YIN Yin<sup>2</sup>

(1. Structure Design and Research Institute, AVIC The First Aircraft Design Institute, Xi'an 100074, China)

(2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Landing gear retracting system is a complex system integrating mechanical, electrical and hydraulic. With the development of simulation technology, it is convenient and fast to study the performance of retracting and retracting system by computer simulation. Aiming at the present situation that the single software simulation method is difficult to realize this kind of complex system, a method combining theoretical analysis and multidisciplinary simulation technology analysis is proposed, which provides a more accurate analysis means for the landing gear retracting system. In this paper, the mechanical dynamics model of the retraction system is established according to the retraction principle of the landing gear model, and then the simulation model of the hydraulic system is established according to the hydraulic principle. On this basis, a multidisciplinary co-simulation model combining the two is completed. Finally, the results of co-simulation under various operating conditions are compared with the experimental results, and the accuracy and convenience of co-simulation technology in the analysis of landing gear retracting system are verified.

**Key words:** landing gear; retraction system; dynamics; co-simulation; test

收稿日期: 2024-01-25; 修回日期: 2024-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(52172368); 江苏省自然科学基金优秀青年基金(BK20220135)

通信作者: 刘成龙(1989-), 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: yzba123@126.com

引用格式: 刘磊, 刘成龙, 姚雄华, 等. 某型飞机主起落架收放系统性能分析与试验验证[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-6.

LIU Lei, LIU Chenglong, YAO Xionghua, et al. Performance analysis and experimental verification of the main landing gear retraction system of a certain type of aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-6. (in Chinese)

## 0 引言

起落架收放系统在飞机安全起降过程中担负着极其重要的使命,作为起落架可收放式飞机必须的功能系统,其性能的优劣直接影响到飞机起飞、着陆、滑跑、地面移动和停放等使用特性<sup>[1]</sup>。因此对于飞机起落架收放系统的性能分析在系统性能评估、故障诊断等方面有着重要的意义<sup>[2]</sup>,而伴随虚拟仿真技术的发展,在进行长周期、大工作量以及费用较高的工程试验之前<sup>[3]</sup>,利用仿真软件对起落架收放系统进行性能分析成为新的趋势。

在起落架收放动力学系统性能仿真分析方面,国内外做了较多工作<sup>[4]</sup>。国外,Florian等<sup>[5]</sup>利用仿真软件 Matlab/Simulink 建立了一套具有较高真实性的收放系统模型,并通过仿真验证了起落架的性能;Pragadheswaran等<sup>[6]</sup>利用 CATIA 设计出一套起落架部件,通过对该起落架的结构进行受力分析仿真,判断其能否承受特定载荷并给出结论;Michal等<sup>[7]</sup>将计算机建模与 ADAMS 模型进行对比分析,得出起落架收放系统中的转动部件之间存在的摩擦力对收放系统性能的影响;Talagani等<sup>[8]</sup>应用虚拟试验技术模拟 A380 飞机符合材料部件的疲劳和静力试验,模拟结果与物理试验结果取得很好的一致性。国内,高文磊等<sup>[9]</sup>通过 AMESim 对收放液压系统进行仿真,分析了节流阀孔径、液压油含气量、液压油黏度等参数对收放过程的影响;吉国明等<sup>[10]</sup>将力学模型与液压系统模型结合进行分析,在简化的液压系统下考虑液压元件对系统压力的影响,取得较好结果;王博等<sup>[11]</sup>利用 Matlab/Simulink 软件工具,建立某多轮多支柱型起落架系统仿真模型并嵌入该飞机六自由度运动结算模型上进行飞行试验,结论与真实飞机基本一致。

上述研究成果大多采用单一仿真软件,未能较好地将机械系统、电控系统以及液压系统联合仿真分析<sup>[12-13]</sup>,在进行起落架收放系统性能仿真分析时,研究的影响因素、参数交互大多也是分散和独立的。而本文采用动力学仿真平台 LMS Virtual Lab Motion 与系统仿真平台 LMS Imagine Lab AMESim 进行起落架机械和电、液控制系统联合仿真,在考虑质量力、气动力、弹簧力、摩擦力及液压力的情况下,对起落架收放系统的性能进行仿真分析,既能够从整个系统的兼容性和协同性上

考虑设计的可靠性与可行性,又可弥补了单独使用某一特定软件仿真造成系统仿真不全面的缺点<sup>[14-15]</sup>。

## 1 起落架收放动力学模型

### 1.1 起落架模型概述

某民用飞机主起落架采用双轮摇臂式机构,主要包含:主支柱,缓冲器,上、下撑杆,上、下锁撑杆,收放作动筒,解锁作动筒,锁弹簧,气弹簧,轮胎与机轮等部件,其中锁弹簧采用双备份的形式,侧撑杆和锁撑杆采用工字梁的形式,锁撑杆为起落架提供下位锁定装置,整套机构由收放作动筒提供动力,气弹簧在收放作动筒失效后辅助起落架进行应急放下。主起落架采用定轴转动收放形式,向内、向前收入起落架舱,主起落架舱门为三段式结构,包括以及上、中、下三个舱门,通过拉杆实现舱门与起落架联动收放,具体结构如图 1 所示。

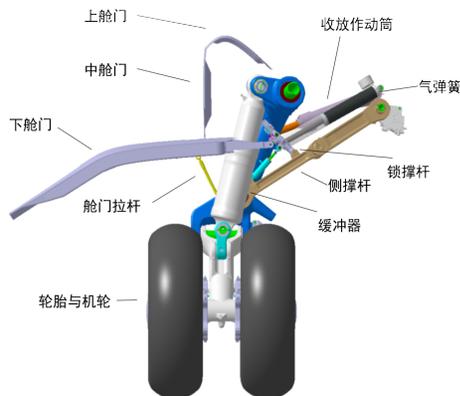


图 1 某民用飞机主起落架模型图

Fig. 1 Model of the main landing gear of a civil aircraft

### 1.2 起落架收放原理

起落架处于放下位置时,系统供压,下位锁开锁作动筒有杆腔进油,无杆腔回油,开锁作动筒缩短并克服弹簧力、摩擦力等实现下位锁开锁,开锁后机构主要在收放作动筒作用下,克服重力、起落架和舱门气动力以及气弹簧力等阻力,完成起落架收上与上位锁上锁,收放过程中开锁作动筒随动,在收上末端收放作动筒需克服开锁作动筒阻力,整个收起过程收放作动筒有杆腔进油,无杆腔回油。

起落架处于收上位置时,系统供压,收放作动

筒两腔同时进油,上位锁开锁作动筒无杆腔进油,有杆腔回油(阻碍起落架放下),上位锁开锁作动筒开锁,在起落架放下到位时,下位锁在开锁作动筒(有利)与下位锁弹簧共同作用下上锁,将起落架锁定在放下位置。

液压系统失效时,上位锁采用电驱动开锁,起落架机构在气弹簧及自身重力作用下,实现应急放下并上锁。

## 2 起落架收放系统仿真

### 2.1 起落架收放机构动力学模型

基于多体动力学分析软件 LMS Virtual. Lab Motion,在保证结构重心及惯性质量不变的情况下,删除起落架上部分用于固定的附属构件及转轴处连接件,从而对模型进行简化。同时在对位置处添加合适的运动副约束,并且施加运动过程中所受到的气动力、弹簧力以及锁机构的接触力等载荷,并将起落架调整至收上位置,最终完成起收放系统的机械动力学建模。起落架主要部件参数如表 1 所示,建立动力学模型如图 2 所示。

表 1 起落架动力模型主要参数<sup>[4]</sup>

Table 1 Main parameters of landing gear dynamic model<sup>[4]</sup>

参数	数值
主支柱/kg	79.600
缓冲器质量/kg	22.821
轮胎(含机轮)/kg	168.800
主起下部组件/kg	53.220
上舱门/kg	5.030
中舱门/kg	15.083
下舱门/kg	20.083
锁弹簧刚度 $K/(N \cdot m^{-1})$	11189
锁弹簧原长 $l_0/mm$	266.08

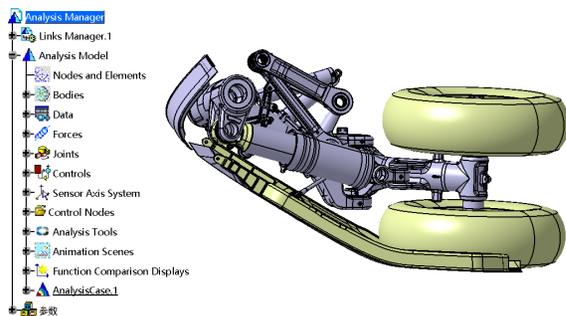


图 2 起落架动力学模型

Fig. 2 Landing gear dynamics model

### 2.2 收放液压系统模型

基于 LMS Imagine. Lab AMESim 系统仿真平台,对收放系统主要液压元件建模,进而搭建完整液压系统仿真模型,如图 3 所示,正常收放过程中(以放下过程为例),起落架选择阀处于左位,应急放选择阀处于右位,安全阀处于左位,收放作动筒伸出,其有杆腔油液被压缩排出经过转换阀右侧进入无杆腔,同时液压泵也向收放作动筒无杆腔补油;应急放下时,起落架选择阀处于中位,应急放选择阀处于左位,安全阀处于左位,转换阀右路通左侧堵住,收放作动筒伸出,其有杆腔油液被压缩排出经过节流阀进入无杆腔及回油箱。液压系统模型主要参数如表 2 所示。

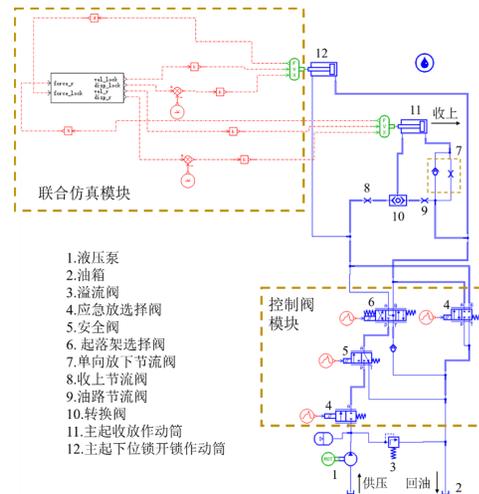


图 3 液压系统建模图

Fig. 3 Hydraulic system modeling diagram

表 2 收放液压模型主要参数

Table 2 Main parameters of retraction hydraulic model

参数	数值
收放作动筒活塞直径 $D_1/mm$	69.67
收放活塞杆直径 $d_1/mm$ <sup>[4]</sup>	33.27
收放活塞杆行程/mm	336
解锁作动筒活塞直径 $D_2/mm$	29.92
解锁活塞杆直径 $d_2/mm$	14.22
解锁活塞杆行程/mm	43
系统工作压力/MPa	20.4
系统流量/ $(L \cdot min^{-1})$	7
收上节流阀孔径/mm	2
放下节流阀孔径/mm	1.3
油路节流阀孔径/mm	3
油液密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	1014
油液体积模量/bar	17395

### 3 联合仿真试验结果对比分析

在建立的起落架收放系统动力学仿真模型以及液压系统模型基础上<sup>[4]</sup>,分别探究最严酷正常收起(330 km/h,迎角 $2.5^\circ$ ,侧滑角 $6.5^\circ$ ,过载1.15),最严酷正常放下(迎角 $-3.5^\circ$ ,侧滑角 $-6.5^\circ$ ,过载0.85)以及最严酷应急放(300 km/h,迎角 $-4^\circ$ ,侧滑角 $-5^\circ$ ,过载0.85)工况下的收放系统性能,并与试验结果及只使用Motion动力学仿真(即无液压系统仿真)的结果作对比分析。起落架收起过程中,考虑质量力、惯性力、气弹簧载荷、气动力、两根下位锁弹簧力及液压力。分别对三种工况下收放作动筒载荷的有液压系统联合仿真数据、无液压系统仿真数据及试验数据作对比分析。

#### 3.1 收放工况对比分析

最严酷正常收起工况收放作动筒载荷如图4所示,在最严酷收起工况时,初期作动筒载荷大小与联合仿真数据吻合较好,随着收上过程的进行,在末端阻尼孔的作用下模型收起过程中受液压阻尼力影响,收放作动筒产生推力促使起落架收起,联合仿真数据与试验数据最大误差约为10.2%,而无液压系统仿真结果在收上过程后半段最大误差约为13.9%,并且在末段部分,收放作动筒的载荷特性与试验数据产生较大差异;最严酷正常放下工况收放作动筒载荷如图5所示,在最严酷放下工况时,起落架放下至约 $75^\circ$ ( $88.5^\circ$ 为初始位置)过程中,由于下落速度较快,收放作动筒液压模型中油液产生的阻尼力提供拉力,阻碍起落架放下,随着起落架运动形式及气动载荷的变化,收放作动筒在后半程提供推力促使起落架放下,过程中,联合仿真数据与试验数据最大误差约为8.3%,而无液压系统仿真数据与试验数据最大误差约为19.1%,并且在整个收放过程中提供推力,初始过程载荷特性差异较大。

加载正常收放流量和压力对比分别如图6~图7所示,在液压系统参数中,收放过程中流量数据与原数据结果相仿,过程中误差最大约为5.3%,无杆腔压力数据在放下过程中与试验数据相仿,最大值为1784 psi,最大误差约为8.9%,收上过程中有杆腔压力的仿真数据与试验数据相比偏小,最大误差约为9.9%。

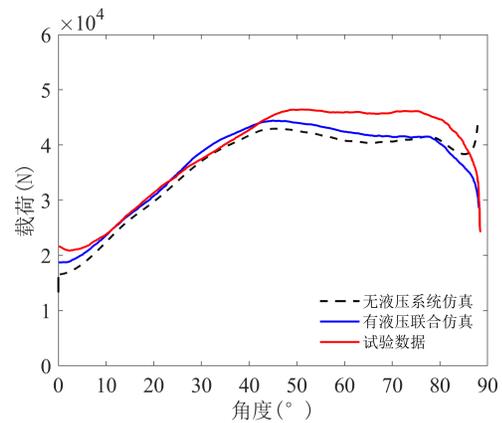


图4 最严酷正常收起工况收放作动筒载荷  
Fig. 4 Retracting actuator load under the harshest normal retracting condition

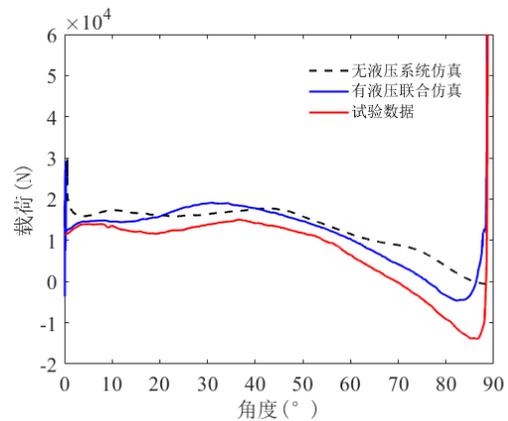


图5 最严酷正常放下工况收放作动筒载荷  
Fig. 5 Retracting actuator load under the harshest normal down condition

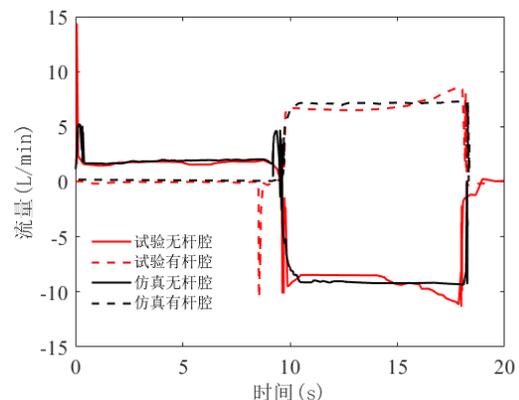


图6 加载正常收放流量对比  
Fig. 6 Load normal receiving and discharging traffic comparison

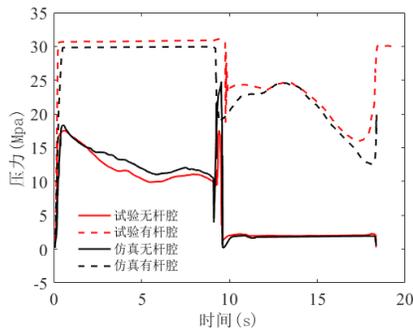


图7 加载正常收放压力对比

Fig. 7 Load normal discharge flow comparison  
Load normal discharge pressure comparison

### 3.2 应急放工况对比分析

最严酷应急放工况收放作动筒载荷如图8所示,在最严酷应急放工况时,起落架放下至约24°后,随着起落架运动过程速度变化,液压模型中剩余油液产生的阻尼提供拉力,阻碍起落架放下,联合仿真数据与试验数据最大偏差约为9.6%,而采用经验公式为放下过程提供阻尼的无液压系统仿真数据虽在最大载荷处与试验数据误差同样约为9.6%,但过程中最大误差达到约21.4%。

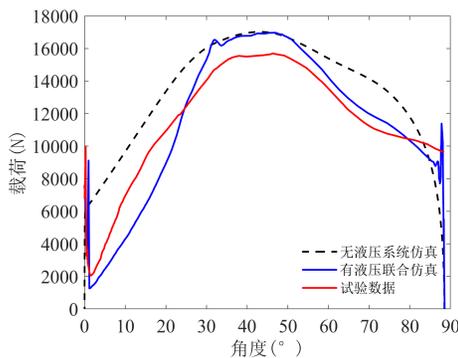


图8 最严酷应急放工况收放作动筒载荷

Fig. 8 Loading of actuator under the harshest emergency discharge condition

加载应急放流量和压力对比分别如图9~图10所示,液压系统仿真数据中,联合仿真流量与试验数据相比偏大,最大偏差处约为6.3%,相位差由收放时间差异引起;而有杆腔压力数据在放下过程末端仿真数据略微大于试验数据,无杆腔由于放下过程没有油液进入,压力始终接近于0。

## 4 结论

1) 在严酷收起和放下工况中,收放作动筒载

荷与试验数据最大偏差约10.2%,两腔流量最大偏差约为8.3%,两腔压力最大偏差约为9.9%,较无液压系统仿真数据更准确。在应急放工况中,收放作动筒载荷与试验数据最大偏差约为9.6%,两腔流量最大偏差约为6.3%。

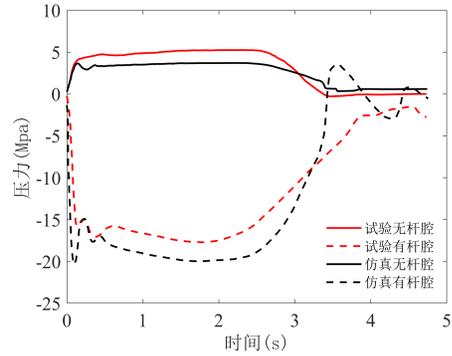


图9 加载应急放流量对比

Fig. 9 Load emergency discharge comparison

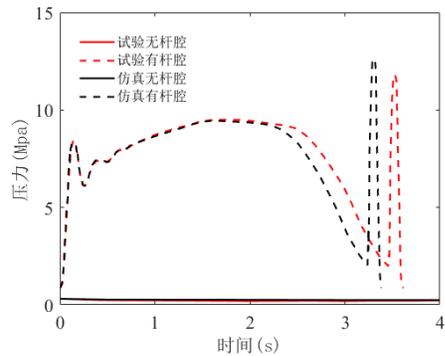


图10 加载应急放压力对比

Fig. 10 Loading emergency discharge pressure comparison

2) 由于采用联合仿真所得数据与试验数据偏差基本控制在10%之内,同时比无液压系统仿真数据更贴近试验数据,认为联合仿真技术在起落架收放动力学系统性能分析中具有较高的准确性。

3) 使用该技术仿真时对各部件系统性考虑较为全面,既增加了起落架收放系统设计的可靠性,又可以缩短设计周期、降低设计成本,加快更新换代周期,具有较好的应用前景。

### 参考文献

[1] 胡庆丰, 邱波, 王小凌. 某飞机起落架未收起故障解析处理[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 91-94.  
HU Qingfeng, QIU Bo, WANG Xiaoling. Analysis and handling of the failure of a certain aircraft's landing gear not being retracted [J]. Electronic Measurement Technology,

- 2022, 45(8): 91-94. (in Chinese)
- [2] 张强, 于辉, 董明波. 某型飞机起落架收放过程仿真[J]. 流体传动与控制, 2009(2): 29-31.  
ZHANG Qiang, YU Hui, TONG Mingbo. Simulation of landing gear retraction and retraction process of a certain aircraft[J]. Fluid Transmission and Control, 2009(2): 29-31. (in Chinese)
- [3] 英福君. 飞机前起落架系统建模仿真与功能模拟[D]. 天津: 中国民航大学, 2021.  
YING Fujun. Modeling, simulation and function simulation of aircraft nose landing gear system[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021. (in Chinese)
- [4] 印寅, 聂宏, 魏小辉, 等. 多因素影响下的起落架收放系统性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(5): 953-960.  
YIN Yin, NIE Hong, WEI Xiaohui, et al. Performance analysis of landing gear retracting system under the influence of multiple factors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(5): 953-960. (in Chinese)
- [5] FLORIAN H, ROLAND L, GOTTFRIED S. High fidelity landing gear modeling for real-time simulation [C] // AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit (MSTCE). Keystone: Colorado, 2006: 6820.
- [6] PRAGADHESWARAN S, BALGURI P K. Conceptual design and linear static analysis of nose landing gear[C] // Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE). India: Chennai, 2015: 1-14.
- [7] MICHAL H, KONRAD F. Design of retraction mechanism of aircraft landing gear[J]. Mechanics and Mechanical Engineering, 2008, 12: 357-373.
- [8] TALAGANI M R, GARG M, GÜRDAL Z D. Virtual testing of GLARE coupons using progressive failure analysis [C] // AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. California: Aerospace Research Central, 2009: 2546.
- [9] 高文磊, 陈东. 飞机起落架收放液压系统仿真与研究[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(12): 64-66.  
GAO Wenlei, CHEN Dong. Simulation and research on retracting hydraulic system of aircraft landing gear[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2017, 37(12): 64-66. (in Chinese)
- [10] 吉国明, 董萌, 付珍娟. 某型飞机起落架收放机构性能仿真[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 169-173.  
JI Guoming, DONG Meng, FU Zhenjuan. Performance simulation of an Aircraft Landing Gear Retracting Mechanism [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(3): 169-173. (in Chinese)
- [11] 王博, 林皓. 多轮多支柱式飞机起落架运动特性仿真研究[J]. 航空工程进展, 2014, 5(4): 502-508.  
WANG Bo, LIN Hao. Simulation study on landing gear motion characteristics of multi wheeled and multi pillar aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(4): 502-508. (in Chinese)
- [12] 陈卫平. 基于多领域统一建模的飞机起落架系统的仿真与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.  
CHEN Weiping. Simulation and analysis of aircraft landing gear systems based on multi domain unified modeling [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [13] 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(4): 427-432.  
NIE Hong, WEI Xiaohui. Key technologies of large civil aircraft landing gear[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008(4): 427-432. (in Chinese)
- [14] 朱伟, 高萌, 黄伟峰. 某型飞机起落架收放系统仿真与性能分析[J]. 航空工程进展, 2015, 6(3): 341-346, 365.  
ZHU Wei, GAO Meng, HUANG Weifeng. Simulation and performance analysis of landing gear retraction and retraction systems for a certain type of aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(3): 341-346, 365. (in Chinese)
- [15] 刘文超, 刘喜藏, 赵浩. 飞机起落架收放控制系统仿真建模与分析[C] // 第六届中国航空科学技术大会论文集. 嘉兴: 中国航空学会. 2023: 6.  
LIU Wenchao, LIU Xizang, ZHAO Hao. Simulation modeling and analysis of aircraft landing gear retracting control system [C] // Proceedings of the 6th China Aviation Science and Technology Conference. Jiaxing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2023: 6. (in Chinese)

(编辑: 马文静)