

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.029

舰载飞机拦阻着舰动力学仿真分析研究

张志冰, 吴江鹏, 高鹏新, 王虎寅

(沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

摘要:基于结构动力学仿真分析技术对舰载飞机在拦阻着舰过程中的结构受力及运动过程进行计算。提出弹射舰载机的起落架结构与拦阻钩的动力学建模方法,建立该机的全机机体结构动力学模型;采用载荷重构技术将气动载荷分布施加于结构动力学模型上;通过瞬态动力学时域响应计算确定结构的动强度薄弱部位与可能发生危险的工况、时刻。该方法能够以低成本研究舰载飞机拦阻着舰过程中的动力学问题,预先发现强度与刚度问题,减少传统设计中的试错-修改环节,有效缩短设计周期,节约研制成本,为飞机的安全试飞及使用创造必要条件。

关键词:舰载飞机;拦阻着舰;起落架;拦阻钩;动响应

中图分类号:V271.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0150-04

Dynamic Simulation Analysis of Carrier-based Aircraft Arresting and Landing

ZHANG Zhibing, WU Jiangpeng, GAO Pengxin, WANG Huyin

(Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: Based on structural dynamic simulation analysis technology, the structural force and motion process of the carrier-based aircraft during the process of arresting and landing are calculated. The dynamic modeling method of landing gear structure and arresting hook of carrier aircraft is proposed, and the structural dynamic model of the whole aircraft body is established. The aerodynamic load distribution is applied to the structural dynamic model by load reconstruction technology. Through the time domain response calculation of transient dynamic, the weak dynamic strength of the structure and the possible dangerous working conditions and times are determined. With the proposed method, the dynamics of carrier-based aircraft in the process of arresting and landing can be studied at low cost, and the strength and stiffness problems can be found in advance, thus the trial and error-modification link in traditional design being reduced, the design cycle being shortened and the development cost being saved, paving the way for the safe flight test and use of aircraft.

Keywords: carrier aircraft; arresting and landing; landing gear; arresting hook; dynamic response

0 引言

舰载飞机是以航空母舰或其他军舰为基地的海军飞机,是在海洋战场上夺取并保持制空权、制海权的重要力量;而舰载机拦阻着舰又是影响舰载机性能的关键,是关乎航空母舰战斗力的重要因素。舰载机拦阻着舰的过程就是当舰载机进场时拦阻钩钩住拦阻索,用拦阻索的阻力迫使舰载机安全减速为零的过程。对于飞机着舰回收技术,国外研究时间较长,大多以实验为主^[1-3]。随着我国舰载机技术的发展,拦阻着舰受到越来越多的关注。郑坤等^[4]对舰载机拦阻着舰系统进行了建模仿真,模拟了拦阻着舰中拦阻系统的工作过程。王陶等^[5]对拦阻索的受力情况进行了分析,并对拦阻索的建模方法进行了研究。吴娟

等^[6]通过建立重型飞机拦阻系统的数学模型,针对受控参数,如飞机的过载、速度、加速度、拦阻带拉力、水涡轮转子的转速等变化规律进行仿真分析。万晨^[7]以MK7-3型拦阻装置系统为例,利用ANSYS有限元软件建立有限元模型进行仿真分析。唐瑞琳、李双宝、王晨等^[8-10]针对飞机起落架建立了动力学模型并开展着陆冲击、地面滑跑等仿真。张江华等^[11]建立舰载机拦阻着舰动力学模型,分析自由飞行钩住方式下水平速度和升降速度对起落架轴向载荷的影响。王永庆等^[12]对舰载机拦阻着舰过程进行物理解析,探求舰载机以及环境参数对其性能的影响,建立了相关性能计算方法,定量评估了甲板风对拦阻着舰的作用。PENG等^[13]建立拦阻钩碰撞甲板的碰撞模型,研究了甲板涂层、俯仰角、航向速度、升降速度和拦

第一作者简介: 张志冰(1973—),男,辽宁凤城人,研究员,博士,研究方向为飞机控制系统设计、总体设计, m15804071794@163.com。

阻钩阻尼器参数对拦阻钩反弹动力学性能的影响。NIE 等^[14]详细论述了舰载飞机着舰拦阻涉及到的关键动力学问题及其研究现状,重点对拦阻钩弹跳动力学及其载荷分析、拦阻索动力学及其载荷分析、升降速度、非对称拦阻对起落架载荷的影响、拦阻系统动力学等方面研究进行了综述。但上述研究对于飞机拦阻着舰关键部件的动力学建模偏于理想化,包括大量采用刚体假设,因此上述研究大多不适用于舰载飞机拦阻着舰的结构刚度与强度分析。刘晶鑫等^[15]建立了起落架多柔性体动力学模型,并进行落震仿真分析。张晓晴、高华峰、熊文强、张浩成等^[16-19]进行了舰载机拦阻着舰刚柔耦合动态响应仿真分析,并通过地面拦阻模拟试验,验证了仿真方法的可行性。高宗战等^[20]以舰载机身主传力结构为研究对象,通过在机身施加拦阻载荷,建立了一种适用于着舰过程的主传力结构刚柔耦合动态响应分析方法。吴扬等^[21]采用刚柔耦合动力学模型对飞机舱门结构进行仿真分析,并参考刚柔耦合方法对舰载飞机拦阻着舰进行建模分析。

本文为解决该类关键设计问题,对舰载机起落架等部件进行动力学理论建模,结合舰载机结构的全机高精度有限元建模,建立拦阻着舰结构动力学分析的模型条件。分析舰载机拦阻着舰过程的载荷变化与边界条件的变化,设置计算工况,基于结构动力学瞬态时域响应分析,确定舰载机在拦阻着舰过程中的运动状态与结构各部分的应力分布,从而为基于舰载飞机的动刚度评估与动强度校核创造条件。

1 结构动力学建模

针对舰载机拦阻过程的动力学响应问题,其模型建立主要包含以下几个方面:舰载机机身建模、舰载机拦阻钩建模、舰载机起落架建模、拦阻器建模以及各种形式力的建模。其中,机身模型与受力模型相结合,能够实现飞机的航向运动学研究,寻找舰载机拦阻过程的拦阻运动规律;起落架在舰载机的着舰过程中起着重要的缓冲作用,其缓冲力及与地面之间的接触力等是影响舰载机垂向运动的一个主要因素;拦阻钩模型常常与拦阻索模型联合建模仿真,来研究钩、索之间的碰撞形式与冲击载荷,这对于设备的强度研究有着重要意义。同时,钩、索啮合是将舰载机系统与航母拦阻系统结合在一起的重要一环,将拦阻装置的输出力和运动特性传递至机身,为机身提供最重要

的拦阻载荷。

舰载机全机结构动力学建模可通过 CATIA、HyperMesh 等软件实现。在建立有限元模型时,从动响应计算的目的分析,要求建立模型的低阶模态具有较高的精度。

有两个建模问题极其关键:一个是承担复杂与严苛动载荷的起落架与拦阻钩系统的建模;另一个是全机结构模型模态准确性的保证。

起落架结构系统由缓冲器、轮胎、斜撑杆、扭力臂等组成,如图 1(a)所示。在不考虑校核起落架本身强度的情况下,可通过落震试验得到起落架-机身连接位置的位移与缓冲载荷随时间变化的曲线,如图 1(b)所示。再结合起落架缓冲器力学模型,给出起落架非线性刚度的数值曲线。

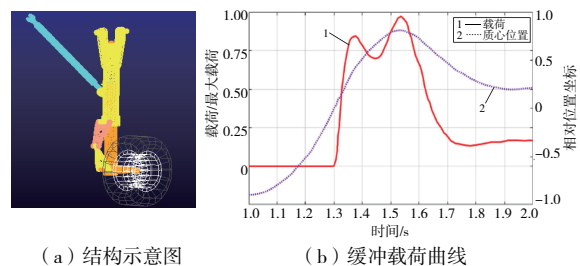


图 1 起落架结构图与缓冲载荷曲线

另一个拦阻着舰仿真的关键部件是拦阻钩索系统,拦阻钩其本身刚度很大,可作刚体处理,但与后机身相连的支撑结构本质是缓冲阻尼器,其阻尼力可用黏性阻尼模型表示。拦阻钩模型常常与拦阻索模型联合建模仿真,钩、索啮合,是将舰载机系统与航母拦阻系统结合在一起的重要一环。液压缓冲式拦阻装置由拦阻索、滑轮缓冲系统、拦阻机系统、钢索系统、钢索末端缓冲系统、拦阻索支撑系统等组成。舰载机拦阻动能主要由位于动、定滑轮之间的主液压缸及与之相连的蓄能器、膨胀气瓶等组成的拦阻机系统来吸收;滑轮缓冲装置主要用来缓解拦阻过程中钢索的张力峰值;拦阻索支撑系统用于保持钢索离地一定的高度,提高钩索成功率。拦阻过程中主油缸中的油液经控制阀被挤压到与膨胀气瓶相连的蓄能器内,到达拦阻终点并将拦阻索从舰载机尾钩上脱卸后打开复位阀。蓄能器中的高压油液经油液冷却器流回到主液压缸,从而实现拦阻索复位并准备下一架舰载机的着舰拦阻。国外拦阻索常简化为弹簧绳一类不考虑质量的模型。这种简化方式能够快速得到作用的拦阻力,但忽略了绳索本身的波动特性,因此仿真得到的结果很光滑,无法反

映由于应力波、弯折波效应引起的拦阻载荷的极端峰值和噪声情况。本文将外索用多体系统描述,如图2所示,组成单元为基本圆柱单元(FCE),各单元之间利用空间约束(SC)两两相连。该空间约束允许3个平动自由度和3个转动自由度。

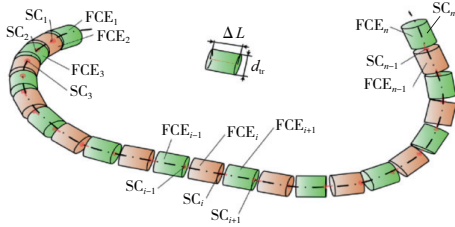


图2 拦阻钩有限元模型

单元的刚度、阻尼可表示为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_{66} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $k_{11} = \frac{E\pi d^2}{4\Delta L}$; $k_{22} = k_{33} = \frac{G\pi d^2}{4\Delta L}$; $k_{44} = \frac{G\pi d^4}{32\Delta L}$; $k_{55} = \frac{E\pi d^4}{64\Delta L}$; c_{ii} 由试验数据或基于经验给出,本文取为 $5 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$ 。

高精度的舰载飞机拦阻着舰的动力学分析离不开准确的全机机体结构动力学模型。该模型采用多种单元混合建模,需要特别注意的是飞机燃油、设备等质量作用的准确建模。着舰过程中机体的振动响应主要是由拦阻载荷与轮胎触舰的冲击作用引起的,其影响动强度响应的成分主要是在低频区域。因此为实现弹射起飞相应的计算,最重要的是关注机体结构的低频模态仿真精度。

最后建立的全机结构动力学有限元模型前3阶的整体模态频率与试验结果相比误差很小,具体结果如表1所示。

表1 全机主要计算模态与实验结果的对比

阶次	试验频率/Hz	动力学模型计算频率/Hz	相对误差/%
1	8.4	8.74	4.05
2	9.8	10.26	4.69
3	12.1	12.23	1.07

2 拦阻着舰的载荷

舰载机在拦阻着舰过程中,稳定的飞行姿态是保证舰载机安全降落的重要因素。在舰载机飞行过程所载荷中,受气动载荷波动最大。因此,有必要在舰载拦阻着舰的动响应分析中引入气动载荷。舰载机上的气动载荷由气动升力、气动阻力和俯仰力矩组成,其计算方法如下。

气动升力 L :

$$L = C_{Ll} QS \quad (2)$$

气动阻力 D :

$$D = C_{Dl} QS \quad (3)$$

气动俯仰力矩 M :

$$M = C_{Ml} QSc_A \quad (4)$$

式中: C_{Ll} 为升力系数; C_{Dl} 为阻力系数; C_{Ml} 为力矩系数; Q 为动压; S 为机翼参考面积; c_A 为机翼平均气动弦长。根据式(2)~式(4)在飞机机翼、尾翼上分别施加气动升力、气动阻力和气动俯仰力矩。

对于拦阻装置,最关注应是输出拦阻力的大小随时间、位移等的变化。该拦阻力可以利用简化模型,依据舰载机冲程与加速度的关系给出简单的拦阻力规律公式,再考虑拦阻索运动状态,加主动动力于拦阻索末端。计算中需要对模拟的拦阻力规律曲线进行验证,使得拦阻过程舰载机加速度仿真曲线满足先增加到一定程度后,保持相对稳定,最后减小到0的趋势,如图3(a)所示。拦阻钩斜向上钩住拦阻索后的载荷如图3(b)所示。

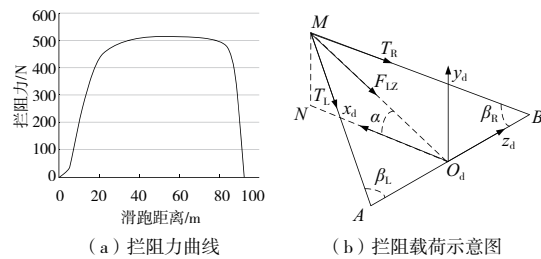


图3 拦阻载荷

图3(b)中, T_L 、 T_R 表示拦阻索左、右端对拦阻钩的拉力; F_{LZ} 为作用在拦阻钩上的合力; α 为拦阻合力相对于地面的夹角; β_L 、 β_R 为绳索相对于初始位置的夹角; x_d 方向为飞机前进的方向。

以对称拦阻为例,在甲板坐标系 $O_d x_d y_d z_d$ 下,飞机 x_d 方向的位移可以表示为

$$S_x = L_{MA} \sin \beta_L \cos \alpha = L_{MB} \sin \beta_R \cos \alpha \quad (5)$$

两端的伸长量为:

$$S_{MA} = L_{MA} - L_{O_d A} = \sqrt{S_x^2 + L_{MN}^2 + L_{O_d A}^2} - L_{O_d A} \quad (6)$$

$$S_{MB} = L_{MB} - L_{O_dB} = \sqrt{S_x^2 + L_{MN}^2 + L_{O_dB}^2} - L_{O_dB} \quad (7)$$

拦阻力可表示为

$$F_{LZ} = T_L \frac{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}}{S_{MA} + L_{O_dA}} + T_R \frac{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}}{S_{MB} + L_{O_dB}} \quad (8)$$

这里认为对称拦阻的拦阻索与拦阻钩啮合点两侧的拦阻索力相等,则根据上图的受力关系和几何关系可以得到拦阻索的拉力为

$$T_L = T_R = F_{LZ} \frac{S_{MA} + L_{O_dA}}{2\sqrt{S_x^2 + S_y^2}} \quad (9)$$

根据相关输入,拦阻合力随滑跑距离的变化规律如图 3(a) 所示。

3 结构动响应分析

基于前文构建的某型号舰载飞机模型,以最典型的最大速度对称着舰工况为例,基于 ADAMS 并针对拦阻载荷分析进行二次开发,对该舰载机的拦阻着舰过程进行仿真分析。工况设置如下:着陆下滑角为 5° ,飞机攻角为 11.5° ,着舰速度为 210 km/h,发动机保持加力。

仿真分析时间以拦阻钩接触拦阻索瞬间为始,计算在 2.5 s 内飞机的冲击响应,步长为 3 500 步。

经过总时长为 3.5 s 的时域动力学仿真,得到了该工况拦阻着舰过程中各典型位置加速度响应。对计算结果进行 50 Hz 低通滤波,曲线如图 4 所示。

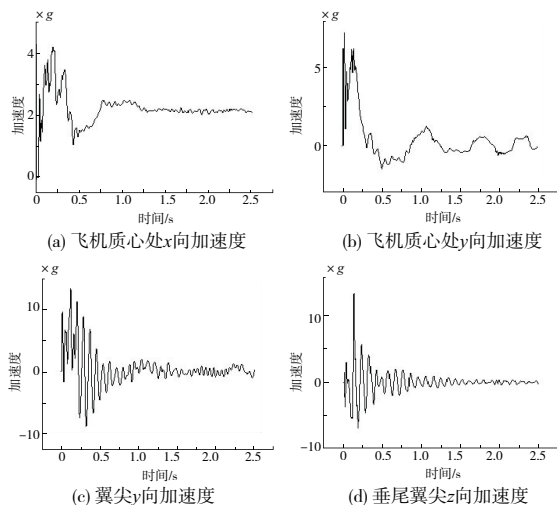


图 4 全机各典型位置加速度曲线

提取着舰拦阻过程中各位置最大加速度,如表 2 所示,其中,全机质心位置 y 向最大加速度为 $7.2g$,比质心最大 y 向过载略大; x 向最大加速度为 $4.2g$,与最大拦阻过载基本一致;其他位置的最

大加速度与经验值规律相同。主起落架缓冲器载荷与轮胎载荷的最大值,在着陆钩与拦阻索撞击后 0.1 s 时分别为 427 kN 与 428 kN。

表 2 典型位置最大加速度

位置	质心 x 向	质心 y 向	翼尖 y 向	垂尾 z 向	机头 y 向	机尾 z 向
最大 加速度 $\times g$	4.2	7.2	13.2	13.3	20.1	9.6

机体弹性变形最大位置在机翼翼尖,为 0.09 m,发生最大变形的时刻是着陆钩与拦阻索撞击后 0.14 s,此时全机的变形云图如图 5(a) 所示(本刊为黑白印刷,疑问之处请向作者咨询)。除拦阻钩本身外,机体结构最大应力发生在着陆钩与拦阻索撞击后 0.15 s,位置在前起落架与机身连接位置,最大应力为 117 MPa,该点的应力随时间变化如图 5(b) 所示。

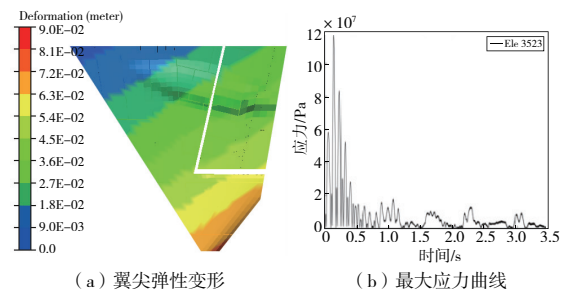


图 5 飞机结构变形与应力响应

通过计算可以发现,拦阻着舰时的拦阻钩局部具有非常大的应力,达到 2 066 MPa,远超过了材料的强度极限,但可以看到这个高冲击应力近似于脉冲作用,时间非常短。考虑实际的钩与索的撞击时间,选用 20 Hz 4 阶巴特沃斯低通滤波后,最大应力降为 60 MPa,满足强度要求。这也与试验得到的安全结果一致。

4 结语

本文阐述了某型舰载机结构与拦阻索系统的结构动力学建模过程,分析了拦阻系统的作用过程与载荷情况,计算了典型工况的舰载机拦阻着舰的运动学状态与动力学响应。特别是对拦阻钩等高动态应力区的动强度进行了分析,并结合试验结果初步证明了计算方法的正确。

本文为后续开展舰载机的动强度校核,以及进一步分析与改善飞机的着舰性能打下了较好基础,也为类似技术问题的解决提供了参考。

(下转第 233 页)

- 究[J]. 科技视界,2015(13):6-7.
- [5] 代君,管宇峰,任淑红. 多旋翼无人机研究现状与发展趋势探讨[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2016,32(16):22-24.
- [6] 张洪. eVTOL 飞行器的发展态势与应用场景综述[J]. 空运商务,2022(12):22-28.
- [7] 王科雷,周洲,马悦文,等. 垂直起降固定翼无人机技术发展及趋势分析[J]. 航空工程进展,2022,13(5):1-13.
- [8] 杨传广,马铁林,甘文彪,等. 垂直起降固定翼无人机技术特点浅析[C]//2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册). 北京:中国航空学会,2017:56-61.
- [9] 高洪波,苏周,张兆海. 垂直起降固定翼无人机发展趋势分析[J]. 科技创新导报,2019,16(22):232-237.
- [10] 刘凯,叶赋晨. 垂直起降飞行器的发展动态和趋势分析[J]. 航空工程进展,2015,6(2):127-138,159.
- [11] KODERA K, MIWA M. Development of tailsitter VTOL using multicopter[J]. The Proceedings of Conference of Chugoku-Shikoku Branch,2019,57:1201.
- [12] 于进勇,王超. 垂直起降无人机技术发展现状与展望[J]. 飞航导弹,2017(5):37-42.
- [13] BELOEV I H. A review on current and emerging application possibilities for unmanned aerial vehicles[J]. Acta Technologica Agriculturae,2016,19(3):70-76.
- [14] JOHNSON W, YAMAUCHI G K, WATTS M E. NASA heavy lift rotorcraft systems investigation [J]. National Aeronautics and Space Administration Ames Research Center, Moffett Field, CA and Langley Research Center, Hampton, VA, 2005(1):3149.
- [15] PAW Y C. Synthesis and validation of flight control for UAV[D]. Twin Cities:University of Minnesota,2009.
- [16] 王子安,龚正,陈永亮,等. 复合翼无人机加速段纵向飞行特性分析与控制设计[J]. 航空动力学报,2019,34(10):2177-2190.
- [17] 王富贵. 小型高速无人机横侧向控制律设计与研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [18] 梁天,肖斯奇,施啸宇. 无人倾转旋翼机直升机模式纵向位置控制律设计[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):172-176.

收稿日期:2023-11-10

(上接第153页)

参考文献:

- [1] 杨一栋. 舰载机进场着舰规范评估[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] MIL-A-8860B. Airplane strength and rigidity, general specification [S].
- [3] MIL-A-8863C. Airplane strength and rigidity, ground loads for carrier-based aircraft [S].
- [4] 郑坤,张达. 舰载机阻拦着舰系统建模与仿真[J]. 机床与液压,2024,52(14):179-186.
- [5] 王陶,黄丹羽,陈国平,等. 拦阻着舰环境下的拦阻索索力识别方法研究[J]. 航空科学技术,2022,33(1):42-48.
- [6] 吴娟,符芳涌,肖勇. 重型飞机拦阻系统的仿真分析[J]. 系统仿真实报,2009,21(20):6643-6646.
- [7] 万晨. 舰载机拦阻装置刚柔耦合系统建模及动态特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [8] 唐瑞琳,巩磊,王博. 飞机起落架动力学建模及地面运动仿真[J]. 科学技术与工程,2021,21(16):6889-6897.
- [9] 李双宝,张博. 航空轮胎着陆冲击动力学仿真与安全分析[J]. 中国民航大学学报,2024,42(2):58-64.
- [10] 王晨,马红亮,王维军,等. 基于工程应用的起落架动力学建模及仿真结果分析[J]. 空天技术,2024(4):62-75.
- [11] 张江华,陈建平,刘小飞,等. 舰载机拦阻着舰起落架动态响应分析[J]. 舰船科学技术,2022,44(16):45-49.
- [12] 王永庆,罗云宝,王奇涛,等. 面向机舰适配的舰载飞机起降特性分析[J]. 航空学报,2016,37(1):269-277.
- [13] PENG Y M, NIE Hong. Dynamics research of arresting hook bounce after touchdown and impacting with deck [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017,38(11):221-233.
- [14] NIE H, PENG Y M, WEI X H, et al. Overview of carrier-based aircraft arrested deck-landing dynamics [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014,35(1):1-12.
- [15] 刘晶鑫,董辉立,马晓琛. 基于有限元柔性体理论的起落架落震仿真分析[J]. 机械设计与制造,2024(3):100-105,110.
- [16] 张晓晴,高华峰,张闰,等. 舰载机拦阻着舰机身动态响应仿真分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(6):8-15.
- [17] 高华峰,张晓晴,李志强,等. 基于 ADAMS 的舰载机拦阻着舰仿真分析[J]. 太原理工大学学报,2018,49(3):488-493.
- [18] 熊文强,张闰,张晓晴,等. 舰载无人机拦阻着舰中机身冲击响应分析[J]. 航空学报,2019,40(12):2228-2292.
- [19] 张浩成,刘晓明,李翀伦,等. 舰载飞机机体主传力结构拦阻冲击动力学试验与仿真分析[J]. 振动与冲击,2020,39(8):72-78,98.
- [20] 高宗战,孔卫宏,朱强,等. 拦阻过程中机身主结构动力学分析与试验研究[J]. 兵器装备工程学报,2024,45(10):199-205.
- [21] 吴扬,吴胜同,裘旭冬,等. 基于 Simcenter3D 的舱门刚柔耦合动力学仿真分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):129-131.

收稿日期:2024-02-23