

起落架缓冲性能关键参数敏感度分析与多目标优化研究



朱晨辰, 黄兆铭, 刘水不腐

中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065

摘要:起落架在飞机起降过程中起承受冲击载荷、吸收着陆撞击能量的作用,其着陆性能的优劣与系统的多参数设计相关。为研究起落架各设计参数对缓冲性能的影响程度,有效指导性能优化参数选择,本文以某型无人机起落架为研究对象,建立其着陆缓冲动力学分析模型,对缓冲系统重要结构充填参数性能影响的灵敏度进行分析,获取起落架缓冲性能优化关键参数组,并采用遗传算法对飞机着陆阶段冲击性能进行多目标优化。结果表明,主油孔流量系数、有效过流面积及有效压油面积对缓冲性能影响较为显著,缓冲器充气压力、充填容积对缓冲性能也有一定影响。经优化后的起落架缓冲性能获得提升,其中着陆最大载荷减小了4.06%,缓冲效率提升了4.44%。本文的研究成果将为后续高性能飞机起落架研发、缓冲性能分析与优化提供参考。

关键词:起落架; 缓冲性能; 敏感度分析; 遗传算法优化

中图分类号: V216

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.06.008

起落架是飞机起降阶段主要的缓冲吸能装置,其性能的优劣与飞机的安全性密切相关^[1]。随着新一代飞机对性能的极致追求,起落架性能需要不断迭代更新以适应复杂多变的飞机服役环境,以至期望在小浮动的结构优化下获得更优的强度性能。因此,研究起落架各关键参数对缓冲性能影响程度尤为关键,将直接为性能优化的参数选择提供指导。

目前,国内外学者在变参数影响上开展了部分研究。徐威等^[2]对单腔油气式缓冲器在不同机体质量、活塞直径、充填参数下的动态特性影响进行了仿真,对该型起落架的设计提供了参数优化指导。张飞等^[3]通过变参数的落震试验,研究了双腔式缓冲器高、低压腔初始压力及体积占比对舰载机突伸性能的影响。沈强等^[4]研究了低压腔初始压力、高低压腔转换支柱临界行程位置、轮胎预压缩量以及油液缩流系数等参数变化对舰载机突伸性能的影响。现有研究大多通过试验及仿真对变参数的性能影响程度开展分析,鲜有通过参数敏感性分析进行参数选择佐证,更为科学

地指导性能优化。

在性能优化方面,Airoldi等^[5-6]运用遗传算法,对某小型飞机非线性起落架模型进行了优化;Felipe等^[7]用遗传算法和粒子群优化(PSO)方法对某型飞机起落架落震缓冲系统进行了优化,获得了较好的性能优化结果;刘天辉等^[8]采用改进后的响应面法,以缓冲效率单目标开展了缓冲器内关键变量的优化,优化后缓冲器效率较优化前增大了4.6%。目前,针对油气式缓冲器开展系统的关键缓冲参数敏感性分析研究较少,且各类型起落架存在结构差异,尚未得到较为系统的起落架缓冲性能优化理论。现有起落架缓冲性能优化的参数选择大多数依据工程经验开展,且采用智能优化算法的研究较少。

本文以某型无人机起落架为研究对象,针对性能优化的参数选择,开展缓冲器部件的关键结构及充填参数的性能灵敏度分析,结合起落架动力学理论确认关键可优化参数组。在此基础上,构建缓冲系统优化分析模型,采用遗传算法对该起落架的着陆冲击性能进行多目标优化,提升该

收稿日期: 2024-11-06; 退修日期: 2025-01-16; 录用日期: 2025-03-18

基金项目: 航空科学基金(2023M009023006)

引用格式: Zhu Chenchen, Huang Zhaoming, Liu Shuibufu. Landing gear buffer performance sensitivity analysis and multi-objective optimization of key parameters[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(6): 70-77. 朱晨辰, 黄兆铭, 刘水不腐. 起落架缓冲性能关键参数敏感度分析与多目标优化研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(6): 70-77.

型起落架的缓冲性能。

1 起落架缓冲性能分析模型

1.1 起落架动力学模型

起落架典型支柱式构型等效为集中质量-弹簧-阻尼器系统,其数理模型原理图如图1所示,缓冲系统分别采用单气腔油气混合形式缓冲器与经典柔性轮胎。

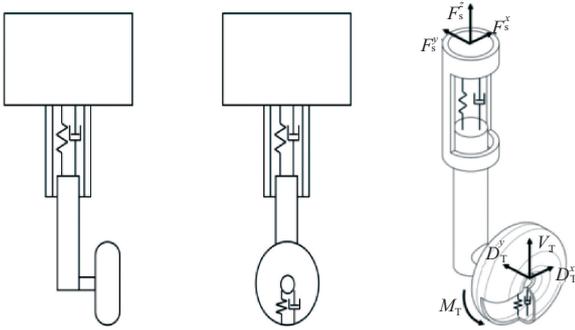


图1 起落架动力学模型

Fig.1 Landing gear dynamics model

飞机着陆动力学过程建模需满足如下假设前提:飞机简化为弹性支撑质量和非弹性支承质量,其中弹性支承质量包括机体和缓冲器外套筒等结构,非弹性支承质量包括缓冲器活塞杆、机轮和轮胎等结构,忽略飞机机体柔性。落震过程初始状态为起落架全伸长,系统以一定速度作垂向运动,依据起落架结构及受力形式进行动力学分析,其方程表达为

$$\ddot{x}_u = \frac{D_T^x - F_S^x}{M_u} \quad (1)$$

$$\ddot{y}_u = \frac{D_T^y - F_S^y}{M_u} \quad (2)$$

$$\ddot{z}_u = g + \frac{F_S^z - V_T}{M_u} \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_T = \frac{M_T - D_T^x(R - \delta)}{I_u} \quad (4)$$

式中, $\{\ddot{x}_u, \ddot{y}_u, \ddot{z}_u\}^T$ 为起落架非弹簧支撑质量块质心在地面坐标系中的加速度分量; ω_T 和 $\dot{\omega}_T$ 为机轮的角速度和角加速度; M_u 为起落架非弹簧支承质量; I_u 为机轮转动惯量; R 为未压缩时的机轮半径; $\{F_S^x, F_S^y, F_S^z\}$ 为起落架作用于机体连接点上的铰点载荷(地面坐标系中); δ 为轮胎压缩量; V_T 为轮胎垂直力; D_T^x, D_T^y 为轮胎航向水平力和侧向水平力, M_T 为机轮制动力矩。

1.2 缓冲性能分析模型

缓冲系统主要由缓冲器与轮胎两个主要部件组成,其中缓冲器通过受冲击载荷压缩耗散着陆冲击能量,其腔内

的空气受力压缩,通过热能进行能量耗散,腔内油液流经阻尼孔产生油液阻尼,通过流体阻尼提供缓冲能力。缓冲器耗能约占整个缓冲系统耗能的70%以上,其余由柔性轮胎进行耗散,缓冲器是起落架吸收着陆冲击能量的主要构件,本文重点针对缓冲器开展研究^[9]。

通过其物理模型构建数学模型^[10],油气式缓冲器可由简化的结构限制、空气弹簧、油液阻尼及摩擦副组成,其轴向力可分解为缓冲器结构限制力 F_s 、空气弹簧力 F_a 、油液阻尼力 F_h 及缓冲器内外筒间摩擦力 F_f

$$F_s = F_l + F_a + F_h + F_f \quad (5)$$

(1)结构限制是为保证缓冲器不发生行程超限发生破坏的结构,结构限制力可表示为

$$F_l = \begin{cases} k_s S, & S \leq S_0 \\ 0, & S_0 < S \leq S_{\max} \\ k_s (S - S_{\max}), & S_{\max} < S \end{cases} \quad (6)$$

式中, k_s 为缓冲器的轴向拉压刚度, S_{\max} 为结构最大行程, S_0 为缓冲器初始行程, S 为实时行程。

(2)空气弹簧为缓冲器中气腔耗能物理模型,其将气腔压缩耗能过程类同绝热过程,通过熵方程可将弹簧力表示为

$$F_a = \frac{A_a P_{a0} V_{a0}^\gamma}{(V_{a0} - A_a S)^\gamma} - A_a P_{\text{atm}} \quad (7)$$

式中, V_{a0} 为气腔初始容积; γ 为空气多变指数; A_a 为气腔当量压气面积; P_{a0} 为气腔初始压力; P_{atm} 为标准大气压力。

(3)油液阻尼为腔内油液流动产生缓冲力的物理模型,根据伯努利(Bernoulli)方程及油液质量连续方程可将油液阻尼力表示为

$$F_h = \frac{\rho_h A_h^3 \dot{S}_i^2}{2C_d^2 A_d^2} \text{sgn}(\dot{S}_i) + \frac{\rho_h A_h^3 \dot{S}_i^2}{2C_{dL}^2 A_{dL}^2} \text{sgn}(\dot{S}_i) \quad (8)$$

式中, ρ_h 为油液密度; A_h 为主油腔有效压油面积; A_d 为正、反行程主油孔有效过流面积; A_{dL} 为正、反行程回油孔面积; C_d 和 C_{dL} 为主油孔、回油孔的流量系数; sgn 为符号函数

$$\text{sgn}(\dot{S}_i) = \begin{cases} 1, & \dot{S}_i > 0 \\ -1, & \dot{S}_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

(4)摩擦力由活塞杆与壁面发生相对运动而产生,可表示为

$$F_f = \frac{K_m F_a \dot{S}}{|\dot{S}|} \quad (10)$$

式中, K_m 为缓冲器皮碗摩擦因数,通常取0.05。

1.3 起落架主要参数

本文以某型支柱式起落架为例,其基本参数见表1。

表1 试验件基本参数
Table 1 Basic parameters of the test piece

缓冲支柱充气 压力/MPa	轮胎充气 压力/MPa	下部 质量/kg	缓冲 行程/mm	最大垂直 载荷/kN
1.80	0.65	22	280	28

2 起落架缓冲性能关键参数敏感度分析

2.1 参数敏感度分析方法与流程

新型号起落架在设计阶段会出现试验实际结果超出设计仿真性能结果的现象,且对于一些旧型号性能提升的改型设计,在现有基础上对结构参数进行优化已达到更优的缓冲性能。针对影响起落架着陆峰值载荷的关键参数开展敏感度分析研究,目的在于为起落架的改型优化设计与性能提升提供指导^[11-13]。整体参数敏感性分析流程如图2所示。

为分析各个参数对起落架着陆缓冲性能影响程度,本文首先在起落架关键缓冲参数范围内进行参数确定,生成参数样本空间,再确定缓冲性能仿真函数目标集,采用基于方差的敏感性分析方法,通过一阶影响指数和总效应指数对各参数的敏感性进行表示。该方法对起落架基本结构参数进行全局敏感度性能影响分析,采样方法选用蒙特卡罗采样法,随机生成均匀分布的随机数,设置采样样本数为20,自变量数目为9,采用基于方差的敏感度分析方法,建立的缓冲性能分析数学模型为

$$y = \phi[x(i)] \quad (11)$$

式中, $\phi[x(i)] = \phi(A_a, \gamma, A_h, A_d, A_{dL}, C_d, C_{dL}, P_{a0}, V_{a0})$,为起落架着陆缓冲性能仿真函数。

建立方差敏感度分析模型,其一阶影响指数公式为

$$S_i \approx \frac{\text{Var}_{X_i} E_{x-i}(Y/X_i)}{\text{Var}(Y)} \quad (12)$$

$$\text{Var}_{X_i} E_{x-i}(Y/X_i) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [Y(B)_j (Y(AB^i)_j) - Y(A)_j] \quad (13)$$

总效应指数模型为

$$S_{X_i} \approx \frac{E_{x-i}(\text{Var}_{X_i}(Y/X_i))}{\text{Var}(Y)} \quad (14)$$

$$E_{x-i}(Y/X_i) \approx \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N [Y(A)_j - Y(AB^i)_j]^2 \quad (15)$$

$$\text{Var}_{X_i} \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y(B)_j [Y(AB^i)_j - Y(A)_j] \quad (16)$$

式中, $\text{Var}()$ 为方差, Var_{X_i} 为 X_i 的方差; X_{-i} 为数组中除 X_i 的其余参数, $E_{x-i}()$ 为不包括 X_i 的期望; $E_{X_i}()$ 为 X_i 的期望; Y/X_i 为数组中仅 X_i 变化的输出函数值。

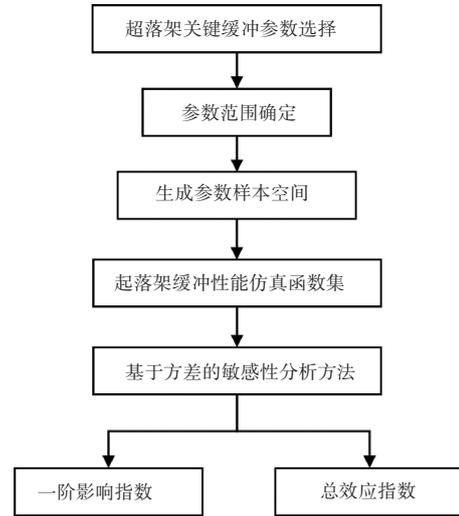


图2 参数敏感性分析流程

Fig.2 Parameter sensitivity analysis flow

2.2 缓冲性能分析模型输入输出参数

确定缓冲性能分析模型输入参数,将各结构参数输入并存储于矢量中,缓冲性能分析模型输入参数见表2,缓冲性能分析仿真结果输出参数见表3。

表2 缓冲性能分析模型输入参数

Table 2 Buffer performance analysis model input parameters

序号	参数	符号/单位
1	弹簧支承重量	M_i/kg
2	下沉速度	$V/(\text{m/s})$
3	轮胎垂直振动当量阻尼系数	$C_f/(\text{s/m})$
4	所有机轮转动惯量	$I_u/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
5	缓冲支柱刚度	kN/m
6	缓冲支柱航向偏角	$A_z/(\text{°})$
7	缓冲器初始充气压力	P_{a0}/MPa
8	缓冲器初始充气容积	V_{a0}/mm^3
9	缓冲器压气面积	A_a/mm^2
10	空气多变指数	γ
11	缓冲器最大行程	S_{max}/mm
12	皮碗摩擦因数	k_m
13	主油腔压油面积	A_h/mm^2
14	回油腔压油面积	A_{hL}/mm^2
15	油液阻尼系数	C_d
16	油孔面积	D_0/mm^2
17	正行程回油腔油孔面积	A_{dL}^+/mm^2
18	反行程回油腔油孔面积	A_{dL}^-/mm^2

2.3 关键参数取值范围

缓冲系统结构参数与充填参数是影响其缓冲性能的关键参数。其中,针对起落架的关键性能影响结构参数有起落架上部质量、缓冲支柱全伸长长度和支柱侧偏角等。针

表3 缓冲性能分析仿真结果输出

Table 3 Buffer performance analysis simulation results output

序号	参数	符号
1	支柱轴向力	F_s
2	油液阻尼力	F_h
3	空气弹簧力	F_a
4	摩擦力	F_f
5	缓冲支柱行程	S
6	垂直载荷	V_t

对缓冲器的参数有当量压气面积 A_a 、空气多变指数 γ 、有效压油面积 A_h 、主油孔/回油孔有效过流面积 A_d 和 A_{dl} 与流量系数 C_d 和 C_{dl} 等参数。关键充填影响参数主要针对缓冲器部件,有气腔充气压力 P_{a0} 和充填容积 V_{a0} 。

由于各个参数对性能的影响程度不同,在此开展性能敏感度分析。其中,针对起落架的结构参数由于设计时需要依据飞机的整体情况进行设计,其对整机结构强度的影响远大于对缓冲性能的影响,不适合当成性能优化对象,故在此不进行性能敏感度分析。试验件基本参数取值范围见表4。

表4 试验件基本参数取值范围

Table 4 Value range of basic parameters of the test piece

符号	参数	取值下限	取值上限
$x(1)$	空气多变指数	1	1.4
$x(2)$	主油孔流量系数	0.6	1
$x(3)$	主油孔有效过流面积/ m^2	25e-6	30e-6
$x(4)$	当量压气面积/ m^2	2200e-6	2300e-6
$x(5)$	有效压油面积/ m^2	1300e-6	1450e-6
$x(6)$	回油孔有效过流面积/ m^2	1200e-6	1350e-6
$x(7)$	回油孔流量系数	0.6	1
$x(8)$	气腔充气压力/kPa	1.62e-6	1.98e-6
$x(9)$	充填容积/ m^3	585e-6	715e-6

2.4 着陆缓冲多参数敏感度计算结果

模型运算结果见表5。单个参数敏感度分析结果如图3所示,多参数相互作用敏感度分析结果如图4所示。其中,表5为各个参数对缓冲性能影响的一阶影响指数、总效应指数及总效应占比的直观显示,图3是各参数及总体在设定步长内对性能的一阶影响指数迭代过程,直观反应单个参数的敏感性分析结果,图4是各参数及总体在设定步长内对性能的总体效应指数迭代过程,直观反映多参数相互作用的敏感性分析结果。

从敏感度分析结果可知,回油孔过流面积及流量系数

表5 参数敏感性分析结果

Table 5 Parameter sensitivity analysis results

符号	参数	一阶影响指数	总效应指数	总效应比值/%
$x(1)$	空气多变指数	0.0149	0.0259	1.7
$x(2)$	主油孔流量系数	0.1501	0.9039	59.31
$x(3)$	主油孔有效过流面积/ m^2	-0.0191	0.2652	17.4
$x(4)$	当量压气面积/ m^2	-0.0036	0.0022	1.44
$x(5)$	有效压油面积/ m^2	-0.0428	0.1900	12.47
$x(6)$	回油孔有效过流面积/ m^2	-0.0016	0	0
$x(7)$	回油孔流量系数	-0.0024	0.0003	0.1
$x(8)$	气腔充气压力/kPa	-0.0202	0.0644	4.23
$x(9)$	充填容积/ m^3	-0.1407	0.0721	4.73

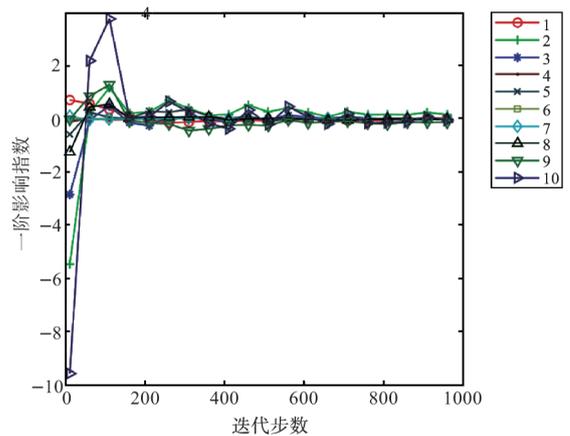


图3 单个参数敏感度分析结果

Fig.3 Single parameter sensitivity analysis results

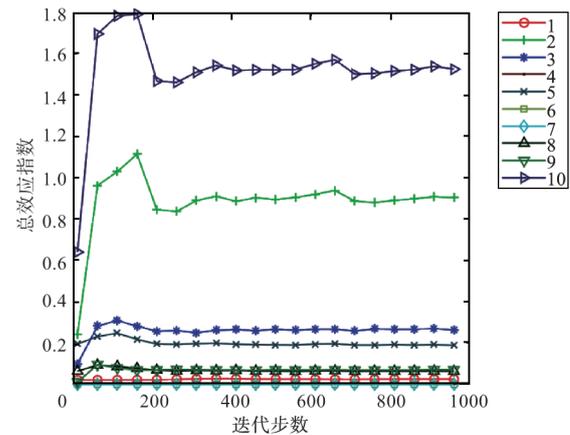


图4 多参数相互作用敏感度分析结果

Fig.4 Sensitivity analysis results of multi-parameter interaction

对起落架峰值载荷影响较小,其主要因为回油孔主要作用于着陆缓冲压缩过程的反行程,被冲击载荷压入主油腔的油通过回油孔进入回油腔,起到反向缓冲作用,保证起落架在缓冲反行程过程载荷平稳过渡。故回油孔结构为缓冲器

重要的辅助结构,但其参数与缓冲性能具有直接明显的影响关系。

由缓冲轴向力数学模型可知,其主要通过空气弹簧与油液阻尼产生缓冲力进行缓冲减载,在此分别对气腔与油腔参数的影响进行分析。

缓冲器气腔内的当量压气面积、气腔充气压力、气腔充填容积及腔内气体的多变指数是重要的结构及充填参数,通过敏感度分析结果可知,压气面积、气腔充气压力及腔内气体的多变指数在单一因素影响与多参数耦合影响差别不大。其中,气体多变指数作为腔内气体的物理属性,在着陆冲击中变化显著,其对性能影响也较为显著。当量压气面积作为缓冲器结构参数对缓冲性能影响较小,该参数由于不同结构形式而存在一定程度的差别。

缓冲器腔内气体充填容积与充气压力对性能影响较大,腔内设计容积确定时,充填容积与缓冲器充油量直接相关,充气量与充填容积相关。这两个参数作为气腔主要的影响参数,其对性能的作用源于气体容积直接代表有多少气体参与压缩缓冲储能,充气压力直接影响气体的压缩特性,受缓冲器的整体设计、缓冲器结构限制行程、充油量及缓冲器结构形式等设计原因制约,在可控范围内作为气腔性能影响参数进行调整可以适当调节分配起落架在不同工况下的缓冲性能。

通过参数敏感性分析结果可得,油腔各参数对性能影响程度较气腔更为显著,其中主油孔流量系数总效应指数占比达59.31%,主油孔有效过流面积占比为17.4%,有效压油面积占比为12.47%。对比一阶影响指数与总效应指数可知,其在油气相互作用整体分析时对缓冲性能影响更为明显。其中,性能影响最为突出的参数为主油孔流量系数,其相关因素很多,油液过流流速、油液黏度、环境温度、油液颈缩面积和油孔面积都与之相关,且作为缓冲器腔内油液的主要固有特性,其通常在设计阶段采用工程经验值,可通过实际试验数据进行参数识别得到。主油孔过流面积是缓冲器关键结构之一,其决定着油液过流速度直接产生的阻尼力大小,也是与流量系数各相关因素均有联系的参数,主油孔面积直接影响颈缩收缩系数、间接影响流速系数。有效压油面积为结构参数,与主油孔及回油孔的面积直接相关,单一作用性能影响不显著,但在整体结构中影响明显。

3 缓冲性能多目标优化

3.1 目标函数

通常飞机着陆垂直地面载荷及缓冲系统效率是衡量该

型起落架缓冲性能好坏的指标,故本文以这两个参数为目标函数,开展起落架缓冲性能优化研究^[14]。

3.2 设计变量

依据参数敏感性分析结果,对缓冲性能影响较大的有主油孔流量系数、主油孔有效过流面积、有效压油面积、气腔充填压力与充填容积。由于主油孔流量系数为固有属性,且与较多因素相关,压油面积与充填容积均是缓冲器内部结构参数,不适合作为优化变量。故选择主油孔有效过流面积及气腔充填压力作为优化设计变量。

3.3 优化方法

遗传算法是基于 Darwin 进化理论及基因遗传学适者生存等思想演变的智能优化算法之一。因具有鲁棒性强、寻优效率高、适应性广泛、并行性好等优点,被广泛应用于机器学习及组合优化等多个领域中。该算法从初代种群开始检索,采用多点并行寻优的方式进行优化运算,通过概率变过度来指导检索进化方向,对传统优化方法需要设置梯度信息来指导优化方向的思路进行了革新,也因此该方法的全局搜索能力较强,相较于传统优化算法能更为准确地寻得全局最优解^[15-16]。

本文将采用遗传算法进行起落架缓冲性能优化研究,用其高效非线性寻优能力来优化该型起落架缓冲性能分析模型,遗传算法流程如图5所示。

3.4 多目标优化模型

该起落架缓冲性能多目标智能优化问题的数学模型可表示为

$$\min F_z(X), \max \eta \quad (17)$$

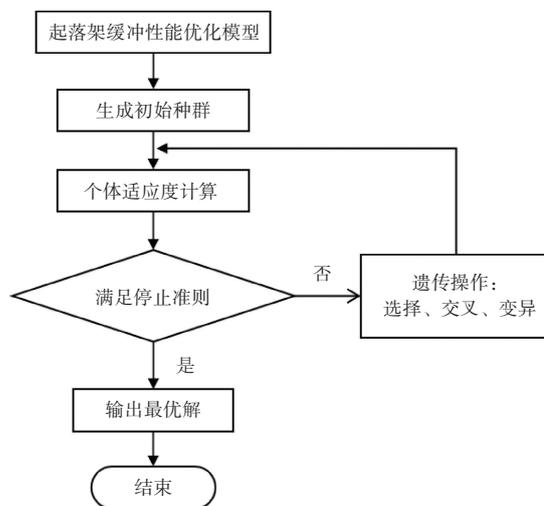


图5 遗传算法优化流程

Fig.5 Genetic algorithm to optimize flow chart

$$P_{a0}^L \leq P_{a0} \leq P_{a0}^U, D^L \leq D \leq D^U \quad (18)$$

$$S \leq S_{\max}, P_Z \leq P_{Z\max} \quad (19)$$

式中, P_{a0}^L 、 P_{a0}^U 为 P_{a0} 缓冲器初始充填压力的取值上下限; D^L 、 D^U 为 D 油孔直径的取值上下限; $P_{Z\max}$ 为最大垂直载荷许用最大值; S_{\max} 为缓冲器结构限制行程。

3.5 优化结果

经过遗传算法优化后的参数见表6、表7。起落架缓冲性能的优劣通常依据起落架地面垂直载荷、缓冲器行程及缓冲效率三个重要特征参数进行表征。如图5可知, 经过遗传算法优化后的缓冲器腔内初始气压、腔内主油孔过流面积都在合理范围内进行了修正。优化后的缓冲器行程、载荷及功量图如图6~图8所示, 由对比图可知, 优化后的地面垂直载荷曲线两个峰值分配更为均衡, 这说明缓冲器气腔内气体压缩吸收的能量, 与油腔油液流经阻尼孔耗散的能量相当, 缓冲器内设计配比平和合理, 最大垂直载荷较优化前减小了4.06%。经优化后的缓冲器占用行程较优化前

表6 优化后的参数值

Table 6 Optimized parameter values

优化目标	缓冲器初始充气压力/MPa	油孔面积/cm ²
优化前	1.800	0.277
优化后	1.655	0.283

表7 优化后的缓冲性能对比

Table 7 Comparison between buffer performance after optimization

优化	缓冲器行程/mm	垂直载荷最大值/kN	缓冲效率/%
优化前	215.1	20.335	75.9
优化后	223.8	19.51	80.34
提升比例/%	—	4.06	4.44

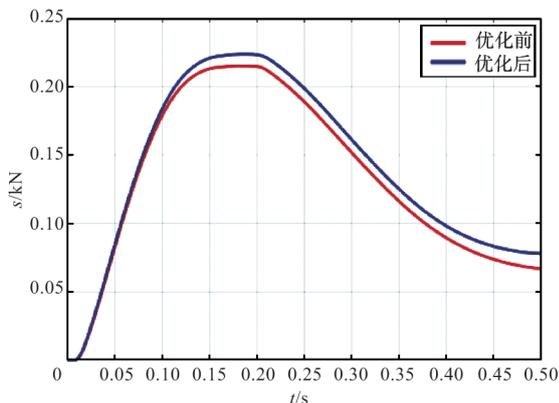


图6 优化前后缓冲器行程随时间变化

Fig.6 Buffer travel changes with time before and after optimization

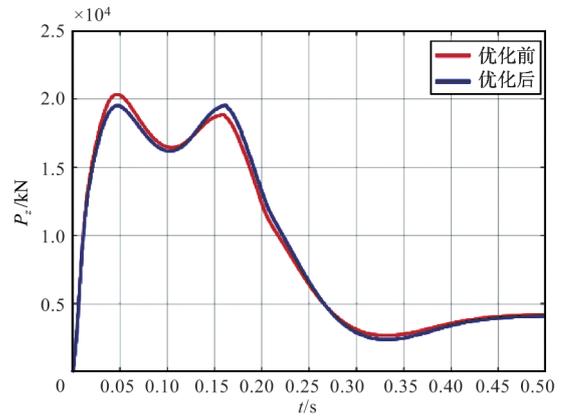


图7 优化前后垂直载荷随时间变化

Fig.7 The vertical load before and after optimization changes with time

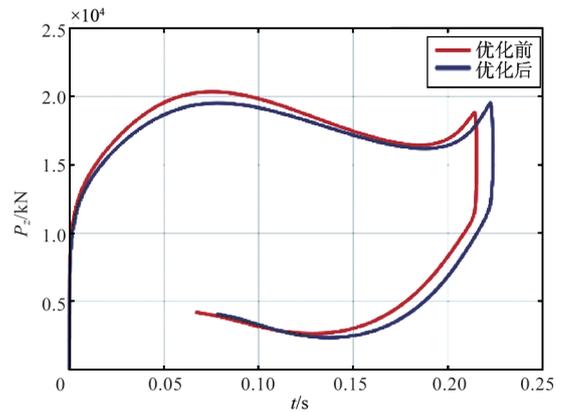


图8 优化前后缓冲系统功量图

Fig.8 The power diagram of buffer system before and after optimization

也获得了提升, 满行程使用率从优化前的86%提升至90%, 对行程的使用率更为充分, 这说明行程更大程度使用以进行压缩耗散冲击能量。缓冲效率从75.9%提升至80.34%, 提升幅度达到4.44%, 该型起落架的缓冲性能经优化后获得了显著提升。

4 结论

通过研究, 可以得出以下结论:

(1) 本文针对起落架缓冲性能问题, 基于着陆动力学模型-参数敏感度分析-性能优化的技术路线, 开展了关键参数敏感度分析与多目标优化研究, 为起落架缓冲性能分析与优化方法提供参考依据。

(2) 以某型无人机为例, 通过参数敏感度分析可得, 缓冲器油腔主油孔流量系数、有效过流面积、有效压油面积及

气腔充气压力、容积对该研究对象起落架缓冲性能影响较为显著,其中主油孔流量系数因其与较多影响因素相关联,其性能敏感度总效应占比达59.31%。

(3)经优化后的起落架缓冲性能获得提升,其中着陆最大载荷减小了4.06%,缓冲效率提升了4.44%。

AST

参考文献

- [1] 航空航天工业部科学技术委员会. 飞机起落架强度设计指南[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989.
Ministry of Aerospace Industry Science and Technology Committee. Aircraft landing gear strength design guide [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989. (in Chinese)
- [2] 徐威, 梁全, 郭丽丽. 飞机起落架油气式缓冲器动态特性方程的推导[J]. 南方农机, 2021, 52(18): 123-125+129.
Xu Wei, Liang Quan, Guo Lili. Derivation of dynamic characteristic equation of aircraft landing gear pneumatic buffer [J]. Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(18): 123-125+129. (in Chinese)
- [3] 张飞, 白春玉, 陈熠, 等. 舰载机前起落架缓冲性能参数敏感性研究[J]. 振动工程学报, 2024, 37(3): 505-511.
Zhang Fei, Bai Chunyu, Chen Yi, et al. Sensitivity study on buffer performance parameters of nose landing gear of carrier-based aircraft [J]. Journal of Vibration Engineering, 2024, 37(3): 505-511. (in Chinese)
- [4] 沈强, 黄再兴. 舰载机起落架突伸性能参数敏感性分析[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 532-537.
Shen Qiang, Huang Zaixing. Sensitivity analysis of fast extension performance of carrier based aircraft landing gear to varying parameters [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 532-537. (in Chinese)
- [5] Airoidi A, Lanzi L. Multi-objective genetic optimization for helicopter skid landing gears [C]. Structural Dynamics & Materials Conference, 2013.
- [6] Airoidi A, Lanzi L. Design of skid landing gears by means of multibody optimization [J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(2): 555-563.
- [7] Felipe A C, Valder S. Identification of a non-linear landing gear model using nature-inspired optimization [J]. Shock and Vibration, 2008, 15(3-4): 257-272.
- [8] 刘天辉, 李占科. 双气腔油气式缓冲器缓冲性能优化分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2014, 30(6): 720-723.
Liu Tianhui, Li Zhanke. Double chamber type buffer performance optimization of oil and gas analysis [J]. Journal of Harbin Commercial University (Natural Science Edition), 2014, 30(6): 720-723. (in Chinese)
- [9] 聂宏, 魏小辉. 飞机起落架动力学设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
Nie Hong, Wei Xiaohui. Aircraft landing gear dynamics design and analysis [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013. (in Chinese)
- [10] 隋福成, 陆华. 飞机起落架缓冲器数学模型研究[J]. 飞机设计, 2001, 11(2): 44-51.
Sui Fucheng, Lu Hua. Research on mathematics model of the aircraft landing gear shock absorber [J]. Aircraft Design, 2001, 11(2): 44-51. (in Chinese)
- [11] 许华超, 朱豪杰, 韩振华, 等. 基于代理模型和敏感度分析的直升机主减速器减振优化[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 402-411.
Xu Huachao, Zhu Haojie, Han Zhenhua, et al. Optimization of helicopter main reducer vibration reduction based on agent model and sensitivity analysis [J]. Journal of Aerodynamics, 2024, 39(11): 402-411. (in Chinese)
- [12] 于秀伟, 金秀芬. 飞机起落架着陆动力学建模与试验分析[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(10): 81-85.
Yu Xiuwei, Jin Xiufen. Modeling and experimental analysis of aircraft landing gear landing dynamics [J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(10): 81-85. (in Chinese)
- [13] 钱康安, 潘晴, 陈嘉宁, 等. 起落架着陆过程建模与多目标参数优化设计[J]. 机床与液压, 2023, 51(14): 86-93.
Qian Kang'an, Pan Qing, Chen Jianing, et al. Modeling and multi-objective parameter optimization of landing gear [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(14): 86-93. (in Chinese)
- [14] 刘向尧, 聂宏, 魏小辉. 大型民机起落架着陆性能仿真分析与优化设计[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(24): 6103-6108.
Liu Xiangyao, Nie Hong, Wei Xiaohui. Simulation analysis and optimization design of landing performance of large civil aircraft landing gear [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(24): 6103-6108. (in Chinese)
- [15] 曾怡兰, 韩东, 刘壮壮. 基于遗传算法的常规复合式高速直升

机飞行性能参数优化[J].航空科学技术,2023,34(9):52-61.

Zeng Yilan, Han Dong, Liu Zhuangzhuang. Flight performance parameter optimization of conventional compound high-speed helicopter based on genetic algorithm [J]. Aeronautical Science & Technology,2023,34 (9):52-61.(in Chinese)

[16] 赵占文, 苏雁飞, 陈军. 基于参数化模型和遗传算法的复合材

料加筋壁板结构选型优化研究[J].航空科学技术, 2015,26(6): 22-26.

Zhao Zhanwen, Su Yanfei, Chen Jun. Optimization of structural selection of composite stiffened panel based on parametric model and genetic algorithm [J]. Aeronautical Science & Technology, 2015,26(6):22-26.(in Chinese)

Landing Gear Buffer Performance Sensitivity Analysis and Multi-Objective Optimization of Key Parameters

Zhu Chenchen, Huang Zhaoming, Liu Shuibufu

Aircraft Structure Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: Landing gear plays the role of bearing impact load and absorbing landing impact energy during takeoff and landing. The landing performance of the landing gear is related to the multi-parameter design of the system. This paper takes the landing gear of a certain UAV as the research object, establishes the dynamic analysis model of its landing buffer, analyzes the sensitivity of the impact of the performance of the important structure filling parameters of the buffer system, obtains the key parameter group of the landing gear buffer performance optimization, and adopts genetic algorithm to carry out multi-objective optimization of the impact performance of the aircraft during the landing stage. The results show that the main oil hole flow coefficient, effective flow area and effective oil pressure area have significant effects on the buffering performance, and the buffer charging pressure and filling volume also have certain effects on the buffering performance. After optimization, the landing gear buffer performance is improved, the maximum landing load is reduced by 4.06%, and the buffer efficiency is increased by 4.44%. The research results of this paper will provide a reference for the subsequent development of high-performance aircraft landing gear, buffer performance analysis and optimization.

Key Words: landing gear; buffer performance; sensitivity analysis; genetic algorithm optimization

Received: 2024-11-06; **Revised:** 2025-01-16; **Accepted:** 2025-03-18

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2023M009023006)