

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.030

有限元仿真与神经网络结合的尾传动轴弹击损伤预测研究

叶飞¹, 林瑶洁², 尹凌¹, 蔡逸飞², 王旦²

(1. 陆军装备部某部, 湖南 株洲 412002; 2. 南京航空航天大学 直升机传动技术国家级重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:面向直升机尾传动轴抗弹击设计要求,开展有限元仿真与神经网络结合的尾传动轴弹击损伤预测研究。通过仿真软件及 Johnson-Cook 本构模型,建立尾传动轴弹击损伤有限元仿真模型并通过弹击试验验证了模型的可靠性。基于有限元仿真获取尾传动轴弹击损伤样本数据,搭建基于 GA-BP 神经网络的尾传动轴弹击损伤预测模型,实现了任意偏移量、入射角度、入射速度组合工况下弹击损伤值的准确预测。依托弹击损伤预测结果数据,分析了偏移量、入射角度、入射速度耦合作用对尾传动轴弹击损伤的影响规律。

关键词:直升机;尾传动轴;弹击损伤;有限元仿真;神经网络

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0161-06

Reserch on Ballistic Damage Prediction of Helicopter Tail Rotor Drive Shaft Based on Finite Element Simulation and Neural Networks

YE Fei¹, LIN Yaojie², YIN Ling¹, CAI Yifei², WANG Dan²

(1. Army Equipment Department, PLA, Zhuzhou 412002, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To meet the anti-ballistic design requirement of helicopter tail rotor drive shaft, a ballistic damage prediction study based on finite element simulation and neural networks is carried out. Based on the simulation software and Johnson-Cook constitutive model, a finite element model for ballistic damage prediction is constructed, and its reliability is validated by a ballistic impact experiment. With the ballistic damage sample data of tail rotor drive shaft obtained from the finite element simulation, a surrogate model is constructed based on GA-BP neural networks, which realizes the precise prediction on the ballistic damage value under combined operating conditions of any impact offset, incident angle and velocity. With reliance on the ballistic damage prediction data, the coupled influence law of the impact offset, incident angle and velocity on the ballistic damage of helicopter tail rotor drive shaft is analyzed.

Keywords: helicopter; tail rotor drive shaft; ballistic damage; finite element simulation; neural networks

0 引言

尾传动轴是直升机传动系统的重要组成部分,其连接着主减速器、中间减速器以及尾减速器并将动力传递给尾桨,从而确保直升机的正常飞行。尾传动轴传统上由铝合金材料制成,并采用薄壁结构^[1]。由于尾传动轴是直升机尾桨动力的唯一传递路径,因此其安全可靠性和至关重要。然而军用直升机在执行战场任务时常处于低空及贴地飞行状态,尾传动轴从机身一直延伸到尾桨,很容易遭受地面轻武器的袭击。一旦尾传动轴遭受弹击并发生断裂,直升机将会发生坠毁事故,由此造成重大的人员伤亡和财产损失。基于此,当前

国内外先进军用直升机尾传动轴均需要进行抗弹击设计工作^[2-3]。而开展尾传动轴弹击损伤研究工作对于尾传动轴抗弹击设计具有重要意义。

目前,国内外已有学者针对尾传动轴弹击损伤开展了相关研究工作并取得了一些成果^[4-9]。然而,相关研究主要是采取弹击试验与有限元仿真方法进行,结果准确性需要依赖于大量的弹击试验和有限元仿真计算,在实际应用中存在局限性。神经网络算法是机器学习中的一种重要算法,其由于具有无需物理模型、求解速度快、预测精准度高等优点,如今被广泛应用于关键结构件的重要参数的预测研究中并取得了一系列成果^[10-12]。不少学者还将有限元方法与神经网络

基金项目:中央高校基本科研项目(NS2024028)

第一作者简介:叶飞(1983—),男,陕西渭南人,工程师,硕士,研究方向为直升机动力传动装备监管与保障, wangdan_053@nuaa.edu.cn。

技术联合使用,从而提高了研究工作的效率,降低了计算成本^[13-15]。然而,当前尚未有借助神经网络算法对尾传动轴弹击损伤进行预测的研究工作。

基于此,本文开展了有限元仿真与神经网络结合的尾传动轴弹击损伤预测研究。以 GA-BP 神经网络为基础,结合弹击仿真获得的尾传动轴弹击损伤样本数据建立尾传动轴弹击损伤预测模型,依托神经网络预测模型获得的弹击损伤结果数据,分析偏移量、入射角度、入射速度耦合作用对尾传动轴弹击损伤的影响规律,从而为直升机尾传动轴抗弹击设计提供理论依据和技术支撑。

1 有限元仿真建模及验证

1.1 弹击参数定义

在真实的战场环境中,子弹会以不同速度、不同入射角度击中尾传动轴的不同部位。为了描述弹击尾传动轴过程中子弹入射位置、方向等,定义相关弹击参数如图 1 所示。设尾传动轴轴线为 z 轴,尾传动轴任意截面上两条正交轴为 x 轴、 y 轴,建立空间正交坐标系 ($Oxyz$)。为了定义在弹击初始时刻的相关弹靶参数,过子弹质心,建立 ($Oxyz$) 的平行坐标系 ($O'x'y'z'$)。其中,子弹速度矢量 v 在面 $O'y'z'$ 内,子弹质心与面 Oyz 的垂直距离定义为偏移量 D ,子弹速度 v 与 y' 轴负方向的夹角定义为子弹的入射角度 α 。

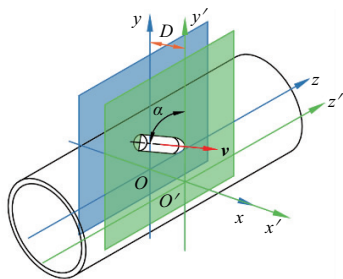


图 1 弹击参数示意图

1.2 材料本构模型

本研究中的尾传动轴由铝合金材料制成,故采用金属高速冲击研究领域广泛使用的 Johnson-Cook 本构模型^[16]及失效准则^[17]表征弹击尾传动轴过程中尾传动轴材料的力学响应。该模型能够反映金属材料在大应变、高应变率状态下的力学特性,目前已被编写到许多商业软件中,并得到了广泛的应用。

Johnson-Cook 本构模型表达式为

$$\sigma = [A + B(\varepsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_a}{T_f - T_a} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ 为 Von Mises 屈服应力; A 为初始屈服应力; B 为应变硬化系数; ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; C 为应变率硬化指数; T 、 T_a 、 T_f 分别为实际温度、室温和熔化温度; m 为温升软化指数; n 为应变硬化指数。

Johnson-Cook 失效准则中单元损伤表示为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

式中: D 为损伤因子,当材料的损伤因子值达到 1.0 时,材料发生破坏; $\Delta \varepsilon_p$ 为等效塑性应变增量; ε_f 为等效破坏应变。其中, ε_f 的具体表达式如下:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_a}{T_f - T_a} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中: $\sigma^* = -R_{cr}$,其中 R_{cr} 为应力三轴度; $D_1 \sim D_5$ 为材料常数;其他参数的含义同式(1)。

本研究中子弹选取了 12.7 mm 口径子弹弹芯,其由高强度钢制成,考虑到其刚度和强度远高于铝合金材料,故采用刚体模型。本研究中尾传动轴材料为 2024-T3 铝合金,高强度钢和 2024-T3 铝合金材料模型参数的具体取值分别参考了文献[18]、文献[19],如表 1 所示。

表 1 材料模型参数

参数	材料类型		参数	材料类型	
	AL2024-T3	高强度钢		AL2024-T3	高强度钢
$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.7	7.85	n	0.73	—
E / GPa	70	206	C	0.008 3	—
ν	0.33	0.3	m	1.7	—
T_f / K	294	—	D_1	0.13	—
T_m / K	925	—	D_2	0.13	—
$\dot{\varepsilon}_0 / \text{s}^{-1}$	597.2	—	D_3	-1.5	—
A / MPa	369	—	D_4	0.007	—
B / MPa	684	—	D_5	0	—

1.3 有限元仿真建模

基于 ABAQUS 仿真软件建立尾传动轴弹击损伤有限元仿真模型。本研究以某型直升机尾传

动轴作为研究对象,其长度为 2 600 mm、外径为 113.2 mm、厚度为 1.6 mm。尾传动轴共由 1 788 544 个 C3D8R 单元组成,为提高计算效率,对弹击区域的网格进行细化。子弹采用 12.7 mm 穿甲弹弹芯,其由 3 924 个 C3D8R 单元组成。边界条件方面,将尾传动轴两端完全固定,对子弹施加刚体约束,通过预定义场施加初速度。子弹与尾传动轴接触形式设置为内部接触,并设置节点侵蚀。建立的尾传动轴弹击损伤有限元仿真模型如图 2 所示。

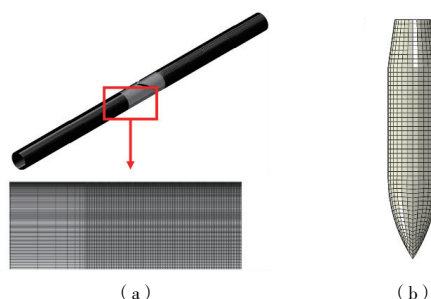


图 2 尾传动轴弹击损伤仿真模型

1.4 模型可靠性验证

为了验证尾传动轴弹击损伤有限元仿真模型的可靠性,本研究开展了不同工况下的尾传动轴弹击试验。在试验基础上,基于有限元模型对 3 种不同工况下弹击试验进行仿真模拟,弹击损伤仿真模拟(左)与试验结果(右)对比如图 3 所示。由图 3 可知,3 种不同弹伤模式下尾传动轴的弹孔形貌与试验结果相近,验证了所建立的尾传动轴弹击损伤仿真模型及参数的可靠性。

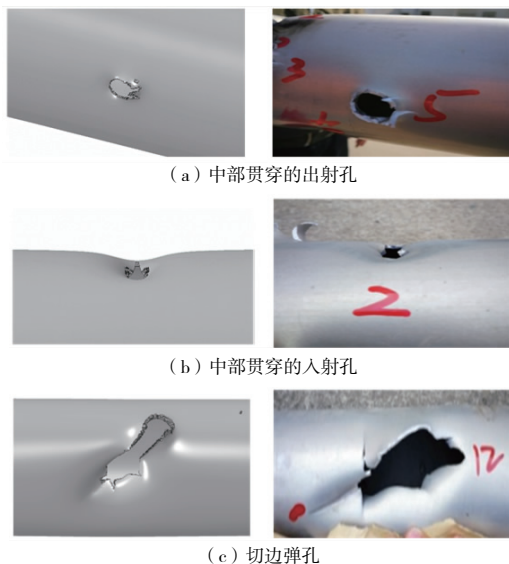


图 3 弹击损伤仿真模拟与试验结果对比

2 基于神经网络的尾传动轴弹击损伤预测模型建立

2.1 弹击参数及损伤评定指标确定

在建立尾传动轴弹击损伤预测模型之前,首先需要确定用于分析的弹击参数。基于现有相关研究可知,偏移量、入射角度和入射速度是影响尾传动轴弹击损伤的典型参数,相关参数定义已在 1.1 节给出。因此本文主要研究这 3 种典型弹击参数对尾传动轴弹击损伤的影响,其次是确定弹击损伤评定指标。考虑到尾传动轴弹击损伤特点,本文采用等效失效体积作为尾传动轴损伤指标,表征尾传动轴弹击损伤程度。该指标同时考虑了弹孔去除体积和弹孔周围残余应变区域的体积,其具体表达式如下:

$$\bar{V} = \frac{\int \varepsilon_i dV_i}{\varepsilon_f} + V_f \quad (4)$$

式中: $\bar{V}$ 为等效失效体积; ε_i 为未失效单元的残余塑性应变; V_i 为未失效单元对应的单元体积; ε_f 为失效应变; V_f 为失效单元体积,表征弹孔去除体积。

基于建立的尾传动轴弹击损伤有限元仿真模型,设置不同的偏移量、入射角度和入射速度开展仿真分析,根据仿真结果获取对应工况下的尾传动轴等效失效体积。

2.2 预测模型建立

神经网络算法是一种模仿人脑分析和处理信息的技术,具有处理多个参数之间复杂和非线性关系的强大能力,如今广泛应用于关键结构件的重要参数的预测研究中。本研究选用预测结果精度较好的 GA-BP 神经网络算法构建尾传动轴弹击损伤预测模型。

首先是确定模型变量和边界。基于 2.1 节的分析,将 GA-BP 神经网络尾传动轴损伤预测模型的输入变量设定为偏移量、入射角度、入射速度,其中偏移量范围为 0~60 mm;入射角度范围为 0°~75°;入射速度范围为 500~800 m/s。弹击损伤预测结果用等效失效体积表征。

其次是试验设计及仿真求解。建立 BP 神经网络模型需要训练和测试两个过程,因此需要获得足够的样本数据集。首先选用试验设计方法生成试验样本点。拉丁超立方试验设计方法可以利用最少的试验样本量来减少测试成本,此外,这种

试验设计能够有效地避免试验中出现随机性扰动,可以得出更加准确的试验数据^[20]。因此将拉丁超立方试验设计方法用于试验样本点的生成,基于试验样本点通过开展尾传动轴弹击损伤有限元仿真模拟获取样本数据,最终获取共 160 组样本数据。文中取 10 组样本数据进行展示,如表 2 所示。

得到样本数据集后,使用 randperm 函数对数值仿真得到的 160 组数据进行随机划分,使得样本具有普适性^[21]。同时,由于输入、输出的数据集具有不同的量纲,因此在测试开始和测试结束时均利用 mapminmax 函数对数据集进行归一化处理,以消除指标之间的量纲影响,解决数据指标之间的可比性^[22]。

表 2 弹击有限元仿真获取样本数据(部分)

工况序号	偏移量/mm	入射角度/(°)	入射速度/(m/s)	等效失效体积/mm ³
1	21.0	0	631	474.07
2	30.5	29	613	538.48
3	4.0	48	591	585.28
4	55.0	72	617	3 316.64
5	16.5	23	530	505.27
6	25.0	75	600	1 566.36
7	46.0	9	564	623.68
8	34.5	4	520	512.20
9	8.5	47	502	555.58
10	8.5	47	502	555.58

本模型建立后通过多次的试验调参,得到最优的模型参数为输入层 3 个神经元,分别为偏移量、入射速度和入射角度;隐含层设置为双层结构,每层具有 16 个神经元。输出层只有一个神经元,为尾传动轴的等效失效体积。GA-BP 神经网络模型结构如图 4 所示。在该网络结构中,相邻两层之间的激活函数使用修正线性单元函数(rectified linear unit, ReLU),该函数在多层网络中具有较快的学习速度。使用 Adam 优化器对神经网络进行训练,并使用方均误差 MSE 作为反向传播的损失函数。在训练过程中,首先设置学习率为 0.05,对模型进行 3 000 次训练,以提高训练效率并快速拟合。为了对模型进一步精细优化,在此基础上使用 0.02 的学习率训练 2 000 次,最终建立了较高精度、满足需求的尾传动轴弹击损伤预测 GA-BP 神经网络模型。

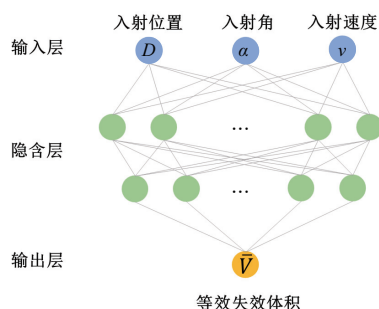


图 4 GA-BP 神经网络模型结构示意图

2.3 预测结果分析

基于建立的尾传动轴弹击损伤预测 GA-BP 神经网络模型,随机选取 128 组数据为训练集,其他 32 组数据为测试集,将数据输入模型进行训练,训练结果如图 5、图 6 所示。

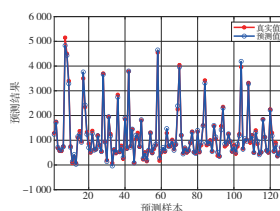


图 5 训练集的预测值和真实值对比图

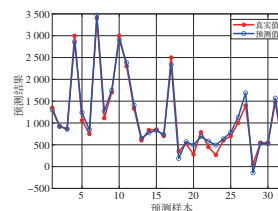


图 6 测试集的预测值和真实值对比图

由图 5 及图 6 可知,训练集和测试集的预测值基本接近真实值。并且经过计算,得到训练集的方均根误差 RMSE 为 0.015 248,测试集的方均根误差 RMSE 为 0.023 52,这说明本模型实现了任意偏移量、入射角度、入射速度组合工况下弹击损伤值的准确预测。

3 弹击参数耦合作用对尾传动轴弹击损伤影响规律分析

基于已建立的尾传动轴等效失效体积与偏移量、入射角度、入射速度之间的 GA-BP 神经网络预测模型,对任意弹击参数组合工况的尾传动轴损伤值进行预测,并获得大量的预测结果数据。本节依托结果数据展开偏移量、入射角度、入射速度的耦合作用对尾传动轴弹击损伤的影响规律分析。分析多因素的大致影响规律和作用效果时,一般借助三维曲面图展开研究。由于本文涉及 3 个因素,而三维曲面图维度可视化局限于三维空间,因此无法在一张图中展示三因素的影响规律。故本节通过分析两两因素之间综合影响的曲面图,以此阐明 3 个弹击参数的耦合作用对尾传动轴弹击损伤的影响规律。

3.1 偏移量-入射速度耦合作用

首先选取在 45° 入射角度下,子弹以不同偏移量、入射速度冲击尾传动轴的损伤体积,绘制三维曲面图,分析偏移量-入射速度耦合作用对尾传动轴损伤程度的影响。偏移量、入射速度对损伤体积的综合影响曲面图如图 7 所示。

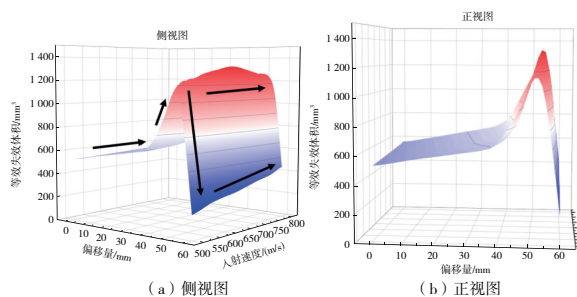


图 7 偏移量-入射速度对损伤体积的综合影响曲面图

由图 7 可知,在相同入射速度下,偏移量对尾传动轴损伤体积的影响规律呈现先增后减、切边弹击损伤最严重的现象。此外,曲面近似呈现偏移量-损伤体积曲线沿入射速度变化方向“拉伸”的特点,这表明图 7 中,偏移量是关键影响因素,而入射速度的影响较小。在子弹沿尾传动轴边缘入射时,随着速度增大,等效失效体积逐渐上升,子弹越不容易发生跳弹现象,尾传动轴损伤越严重。

3.2 入射角度-入射速度耦合作用

其次选取在偏移量为 25 mm 情况下,子弹以不同入射角度、入射速度冲击尾传动轴的损伤体积,绘制三维曲面图,分析入射角度-入射速度耦合作用对尾传动轴损伤程度的影响。入射角度、入射速度对损伤体积的综合影响曲面图如图 8 所示。

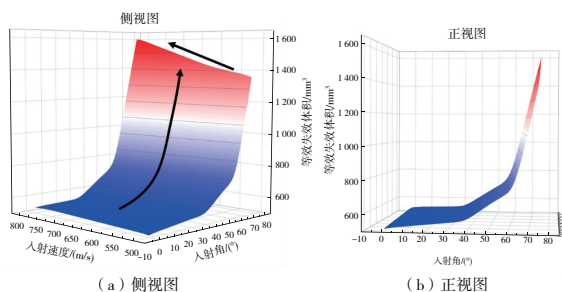


图 8 入射角度-入射速度对损伤体积的综合影响曲面图

由图 8 可知,当入射速度一致时,入射角度越大,损伤体积越大。曲面同样近似呈现入射角度-损伤体积曲线沿入射速度变化方向“拉伸”的特

点。这表明入射角度是关键影响因素,而入射速度的影响较小。在大入射角度下,等效失效体积随入射速度的增大而增大。这主要是由于子弹速度越小,入射角度越大,越容易发生偏转,越容易出现跳弹现象,因此造成的损伤越轻微。

3.3 偏移量-入射角度耦合作用

选取在入射速度为 500 m/s 时,子弹以不同偏移量、入射角度冲击尾传动轴的损伤体积,绘制三维曲面图,分析偏移量-入射角度耦合作用对尾传动轴损伤程度的影响。偏移量、入射角度对损伤体积的综合影响曲面图如图 9 所示。

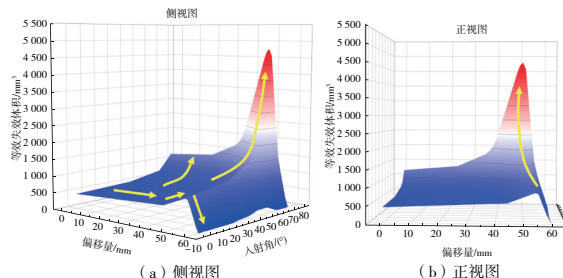


图 9 偏移量-入射角度对损伤体积的综合影响曲面图

由图 9 可知,首先,偏移量、入射角度对损伤体积的综合影响曲面图存在一个最大峰值点。该点在切边弹击、大入射角度的工况下出现,表明此工况下,尾传动轴损伤最为严重,必须加以重视。其次,在相同入射角度下,偏移量对尾传动轴损伤体积的影响规律呈现先增后减、切边弹击损伤最严重的现象;在相同偏移量下,随着入射角度逐渐增大,损伤体积逐渐增大,尤其是在切边位置时,损伤体积急剧上升。最后,随着入射角度的增大,局部峰值对应的偏移量逐渐左移。此表明入射角度会影响损伤最严重情况对应的偏移量。

4 结语

本文通过有限元仿真与神经网络结合,建立了基于 GA-BP 神经网络的直升机尾传动轴弹击损伤预测模型。依托神经网络预测模型获得的弹击损伤结果数据,分析偏移量、入射角度、入射速度耦合作用对尾传动轴弹击损伤的影响规律,得到了以下结论。

1) 基于 ABAQUS 仿真软件建立了尾传动轴弹击损伤有限元仿真模型,并通过实际弹击试验充分验证了有限元仿真模型具有可靠性。

2) 基于有限元仿真获取样本数据,建立 BP 神经网络模型,并采用遗传算法 (genetic

algorithm, GA) 进行优化,建立了尾传动轴损伤体积与偏移量、入射角度、入射速度之间的 GA-BP 神经网络预测模型,在减小工作量、提高计算效率的同时,实现了在任意弹击参数组合工况下尾传动轴损伤值的准确预测。

3) 基于神经网络预测模型获取任意偏移量、入射角度、入射速度组合工况下的尾传动轴损伤值,依托结果数据展开偏移量、入射角度、入射速度的耦合作用对尾传动轴弹击损伤的影响规律分析,获得了以下结论:a) 对尾传动轴弹击损伤而言,偏移量与入射角度会对其产生较大的影响,入射速度对尾传动轴损伤的影响较小;b) 在其他因素一致时,偏移量对尾传动轴损伤的影响始终保持先增后减、切边弹击损伤最严重的规律;c) 入射角度对尾传动轴损伤体积的影响始终保持逐渐增大的规律,入射角度还会影响尾传动轴损伤最大值对应的偏移量,入射角度越大,其损伤最大值对应的偏移量越小。

参考文献:

- [1] 熊俊,李晓绪,孙金凤. 直升机尾传动轴系统研究综述[C]//2021 年中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 青岛:航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司,2021:172-175.
- [2] 余亦曦,康丽霞,唐朋. 直升机传动系统的现状与发展研究[J]. 航空科学技术,2021,32(1):78-82.
- [3] 赵思波,万振华,王希. 直升机尾传动轴弹击损伤仿真与试验验证[J]. 长沙航空职业技术学院学报,2022,22(3):6-9.
- [4] COLOMBO D, GIGLIO M. Numerical analysis of thin-walled shaft perforation by projectile[J]. Computers & Structures, 2007, 85(15/16):1264-1280.
- [5] MANES A, LUMASSI D, GIUDICI L, et al. An experimental - numerical investigation on aluminium tubes subjected to ballistic impact with soft core 7.62 ball projectiles[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 73:68-80.
- [6] 郭民昕,宁向荣,赵思波. 基于动力学仿真的直升机尾传动轴中部弹击损伤规律研究[J]. 长沙航空职业技术学院学报,2021,21(1):1-5.
- [7] 米栋,龙湘云,赵思波,等. 一种直升机尾传动轴抗弹击损伤容限分析方法[J]. 推进技术,2022,43(2):94-103.
- [8] 未雷,林瑶洁,吴汪箭,等. 直升机尾传动轴弹击损伤数值模拟研究[J]. 振动与冲击,2024,43(13):324-332,340.
- [9] 吴启舟,沈意平,王送来,等. 直升机尾传动轴弹体冲击动力响应与失效破坏[J]. 兵器装备工程学报,2024,45(5):119-128.
- [10] ZHANG H, TIAN Z G. Failure analysis of corroded high-strength pipeline subject to hydrogen damage based on FEM and GA-BP neural network[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(7):4741-4758.
- [11] VIJAYA KUMAR S D, KARUPPANAN S, OVINIS M. Failure pressure prediction of high toughness pipeline with a single corrosion defect subjected to combined loadings using artificial neural network (ANN)[J]. Metals, 2021, 11(2):373.
- [12] 姜逢源,赵玉良,董胜,等. 基于遗传算法的 BP 神经网络对海底管道受撞击损伤预测[J]. 海洋湖沼通报,2019,41(3):52-59.
- [13] 许志鹏,刘婵,冯红翠. 基于有限元和 RBF 神经网络的液压支架前连杆疲劳寿命预测[J]. 机械设计,2024,41(1):110-116.
- [14] 郭生根,周双喜. 基于有限元仿真及神经网络模型相结合的大体积混凝土温度预测方法[J]. 水利水电技术,2018,49(11):188-196.
- [15] 申建国,汪舟,卢伟,等. 有限元模拟和神经网络相结合的喷丸处理 SAE9254 钢疲劳寿命预测[J]. 机械工程材料,2024,48(7):77-84.
- [16] JOHNSON G R, COOK W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21:541-548.
- [17] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1):31-48.
- [18] 侯二永. 陶瓷间隙靶抗 12.7 mm 穿甲燃烧弹机理及性能研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008.
- [19] BUYUK M, KAN S, LOIKKANEN M J. Explicit finite-element analysis of 2024-T3/T351 aluminum material under impact loading for airplane engine containment and fragment shielding[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, 22(3):287-295.
- [20] 蒯腾飞,林昌航,杨春浩,等. 基于拉丁超立方试验设计的滑动适配器刚度优化[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(10):26-29,70.
- [21] 吴少杰,刘怀举,张仁华,等. 基于正交实验和数据驱动的喷丸表面完整性参数预测[J]. 表面技术,2021,50(4):86-95.
- [22] 石明,汪舟,甘进,等. 基于 GA-BP 神经网络的喷丸样品表层硬度预测模型[J]. 表面技术,2022,51(1):332-338,357.