

文章编号: 1674-8190(2023)04-110-06

# 复合材料加筋结构冲击定位算法有效性分析

张阳<sup>1</sup>, 杨宇<sup>1</sup>, 齐舸<sup>2</sup>, 张盛<sup>1</sup>

(1. 中国飞机强度研究所 智能结构与健康管理技术研究室, 西安 710065)

(2. 航空工业西安航空计算技术研究所 第三研究室, 西安 710068)

**摘要:** 随着复合材料在飞机结构上的大量应用, 外来物的冲击造成复合材料内部出现分层等目不可见的损伤威胁越来越多, 因此, 对复合材料加筋结构进行冲击事件监测、冲击定位识别是非常必要的。为了验证冲击定位算法的工程有效性, 基于复合材料大壁板结构上冲击试验的压电传感信号, 比较时间反转聚焦、误差函数和互相关函数三种冲击监测算法的定位精度。结果表明: 在 2 360 mm × 1 260 mm 监测区域内, 互相关函数算法在复杂结构定位中的误差最小, 可应用于冲击监测设备开发。

**关键词:** 结构健康监测; 加筋复合材料结构; 冲击定位; 时间反转聚焦算法; 互相关函数算法; 误差函数算法

中图分类号: V214.8

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.04.12

## Effectiveness analysis of impact location algorithm for composite reinforced structures

ZHANG Yang<sup>1</sup>, YANG Yu<sup>1</sup>, QI Ge<sup>2</sup>, ZHANG Sheng<sup>1</sup>

(1. Smart Structures & Structural Health Monitoring Research Department, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(2. The Third Research Department, AVIC Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** With the large-scale application of composite materials in aircraft structures, the threat of visually invisible damage such as internal delamination of composite materials caused by impact from foreign objects is increasing, therefore, impact event monitoring and impact location identification of composite reinforced structures is essential. In order to verify the engineering validity of the impact localization algorithm, based on the piezoelectric sensing signal of the impact test on the composite large wall plate structure, the localization accuracy of the time-reversal focusing, error function and cross-correlation function impact monitoring algorithms is compared. The results show that, in the monitoring area of 2 360 mm × 1 260 mm, the error of the cross-correlation function algorithm is smaller than that of the time-reversal focusing algorithm, and the error of the time-reversal focusing algorithm is larger at the truss, which is not suitable for impact positioning of reinforced structures.

**Key words:** structural health monitoring; reinforced composite structures; impact location; time-reversal focusing algorithm; cross-correlation function algorithm; error function algorithm

收稿日期: 2022-07-27; 修回日期: 2022-11-29

通信作者: 张阳, zhangyang3320@163.com

引用格式: 张阳, 杨宇, 齐舸, 等. 复合材料加筋结构冲击定位算法有效性分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 110-115.

ZHANG Yang, YANG Yu, QI Ge, et al. Effectiveness analysis of impact location algorithm for composite reinforced structures [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(4): 110-115. (in Chinese)

## 0 引言

复合材料因其优异的综合力学性能和减重能力,已在航空航天、汽车等领域获得广泛应用<sup>[1]</sup>。随着复合材料层合板在飞机结构上的应用越来越多,其在服役过程中容易遭受各种环境下的冲击,例如,飞机在起飞、着陆和滑行阶段,跑道砂石、轮胎碎片或冰雹等的冲击;飞机停机维修时维修工具掉落等。这种冲击容易导致复合材料层合板出现肉眼无法观测到的基体开裂和分层等损伤。而这种隐性损伤会导致复合材料层合板的强度和寿命大幅下降,对结构的安全性造成严重影响<sup>[2]</sup>。因此,对复合材料层合板进行冲击事件监测、冲击定位识别是非常必要的。冲击定位识别算法中,首先发展的是基于应力波的波达时间定位方法<sup>[3-6]</sup>,但复杂结构会因为信号频散、各项异性等影响因素,很难获得准确的波达时间。人工神经网络技术<sup>[7-8]</sup>和先进的信号处理技术<sup>[9]</sup>皆可用于提高波达时间的提取精度。目前,冲击定位算法大多在实验室进行较小监测范围的定位研究,邱雷等<sup>[10]</sup>提出一种基于 Shannon 复数小波和时间反转聚焦的定位方法,在 300 mm×300 mm 监测区域内的冲击定位误差小于 20 mm;张宇等<sup>[11]</sup>提出一种基于互相关函数的碰撞强度谱定位方法,在 500 mm×500 mm 加筋板冲击区域内定位误差小于 42 mm;杨雷等<sup>[12]</sup>提出一种基于误差函数的定位算法,在 700 mm×450 mm 复合材料加筋板监测区域内定位误差小于 14.56 mm;李蒙等<sup>[13]</sup>应用 BP 神经网络算法,在 80 mm×80 mm 复合材料监测区域的定位误差保持在 8 mm 以内。上述研究中,人工智能算法需要在定位之前输入大量信号进行模型训练,实用性较低。

为了确定冲击定位算法在工程实践性中的有效性及实用性,本文应用 2 360 mm×1 260 mm 复合材料加筋壁板结构的落锤冲击数据,针对时间反转聚焦、误差函数和互相关函数算法定位误差进行对比分析,确定适用于复杂复合材料结构的冲击定位算法,以期冲击监测机载设备的开发提供参考。

## 1 定位算法

本文应用时间反转聚焦算法、误差函数算法

和互相关函数算法进行有效性分析,时间反转聚焦算法不需要对结构进行建模或通过试验方法来测量波的传递函数,只与波的传播速度相关,获取波的传播速度就可以实现 Lamb 波的相位合成时间反转聚焦。基于误差函数的冲击定位算法,在信号归一化后应用阈值来确定不同传感器之间的波达时间差,对信号测量精度要求较高。互相关函数算法反映两种不同信号的相似性,根据互相关求得的信号时延,在冲击点处互相关函数值为最大,无需先验知识,可直接实现结构冲击定位。

### 1.1 时间反转聚焦算法

时间反转聚焦算法在结构的冲击定位领域多有研究<sup>[9]</sup>,其基本原理为将传感器接收到的冲击响应信号进行时间反转,作为激励信号施加在对应的传感器上,重新激励的传感器信号只会聚焦在真实的冲击源位置。该算法的实现过程为

- 1) 对冲击采集到的信号进行连续小波变换,求得各信号的复系数模  $V_s(t)$ ;
- 2) 将冲击监测区域划分为小网格,求得每个网格节点与传感器的距离  $S_i$ ,之后计算各个距离与第一个传感器的距离差  $T_i$ ;
- 3) 计算每个传感器接受信号相对于第一个传感器的信号延迟;
- 4) 将每个传感器信号时间反转再延迟求和得到  $V_h(t)$ ;
- 5) 循环计算监测区域内各网格点的  $V_h(t)$ ,最大值即为冲击位置。

### 1.2 误差函数算法

基于误差函数的冲击定位算法,应用阈值法确定不同传感器的波达时间差,基于波达时间差构建误差函数  $E(x, y)$ ,将平板划分为有限元单元,计算每个网格节点的  $E(x, y)$  作为  $(x, y)$  的像素值,即作为冲击点的可能性, $E(x, y)$  值最小的节点即为预测的冲击位置。该算法的实现过程为

- 1) 按最大绝对幅值对信号进行归一化处理,求得传感器的归一化信号  $S_i(t)$ ;
- 2) 设置信号阈值,以阈值对应时刻求得应力波到达各传感器的时刻  $t_i$ ,计算波达时间差  $\Delta t_{ij}$ ;
- 3) 将冲击监测区域划分为小网格,求得每个

网格点与各个传感器之间的距离  $L_i$ ;

4) 构建误差函数:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \left| L_i - L_j - (L_k - L_l) \times \frac{\Delta t_{ij}}{\Delta t_{kl}} \right| \quad (1)$$

5) 循环计算监测区域内各网格点的  $E(x, y)$ , 定义每个坐标点的冲击概率为

$$P(x, y) = \frac{\min E}{E(x, y)} \quad (2)$$

以每个坐标点的概率值作为像素值, 冲击概率成像, 概率最大的位置即为预测的冲击位置。

### 1.3 互相关函数算法

互相关函数算法的原理为, 两个压电传感器接收到冲击信号的时间差, 可通过对两个冲击信号进行小波变换之后再互相关函数运算求得。互相关函数的定义为

$$R_{12} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(t) f_2(t + \tau) dt \quad (3)$$

其可以反映两个时间序列在任意两个不同时刻的取值之间的相关程度。该算法的实施过程为

1) 对冲击采集到的压电传感器信号进行连续小波变换, 求得各信号的复系数模  $M_i$ , 对任意两个计算得到的复系数模进行互相关函数变换得到  $R_{ij}$ ;

2) 将冲击监测区域划分为网格, 计算每个网格点  $(x, y)$  相对于  $i$  号传感器和  $j$  号传感器之间的距离差  $D_{ij}(x, y)$ , 以此得到时间差  $T_{ij}(x, y)$ ;

3) 计算每个网格点的像素值:

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n R_{ij}[T_{ij}(x, y)] \quad (4)$$

4) 求得  $P(x, y)$  最大值的  $(x, y)$ , 即为冲击位置。

## 2 试验

### 2.1 试验设备及传感器布局

试验件为  $2\ 360\ \text{mm} \times 1\ 260\ \text{mm}$  复合材料加筋壁板结构件, 如图 1 所示。试验件共由三部分组成: 复合材料蒙皮、5 根长桁、4 个加强框。蒙皮及长桁采用复合材料 DA3202 制造, 单层厚度  $0.15\ \text{mm}$ 。蒙皮铺层顺序为  $[45/-45/-45/90/$

$45/0/90/0]_s$ , 长桁为帽型长桁, 铺层顺序为  $[45/0/0/-45/90/0]_s$ , 间距为  $210\ \text{mm}$ 。加强框选用 2024 铝合金制造。因为压电传感器数据线较为繁琐, 布置在冲击面会影响试验进程, 所以将压电传感器粘贴在结构件长桁与加强框一侧, 将光滑表面作为冲击面。传感器位置、试验件具体结构参数及冲击点位置如图 1 所示。试验件共布置 48 个压电传感器, 由于采集设备的通道限制, 将监测区域划分为两部分进行传感器信号的采集。试验件两侧由专用夹具将结构两端固定在试验室承力地坪上, 如图 2 所示。冲击装置为中国飞机强度研究所自行研制的三角支撑型落锤装置, 冲击能量为  $5\ \text{J}$ ; 采集设备为大连理工大学研发的压电信号采集设备(如图 3 所示), 共 32 通道, 并行实时采集与阈值触发采集, 采样频率为  $200\ \text{kHz}$ 。

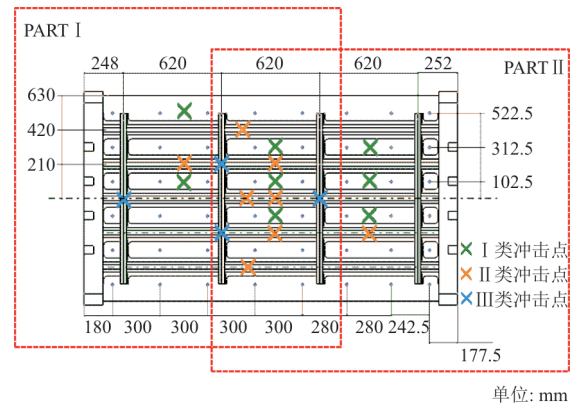


图 1 试验件结构、传感器布局及冲击位置  
Fig. 1 Structure of test piece, sensor layout and impact locations

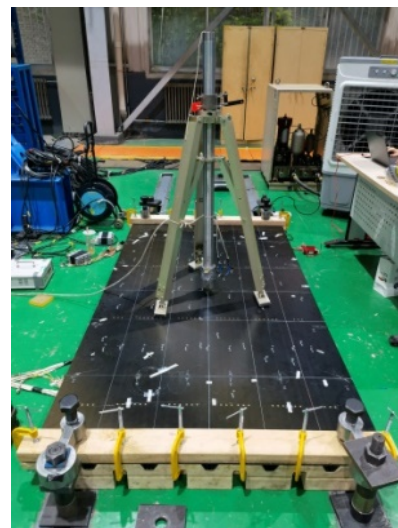


图 2 冲击装置  
Fig. 2 Impact device

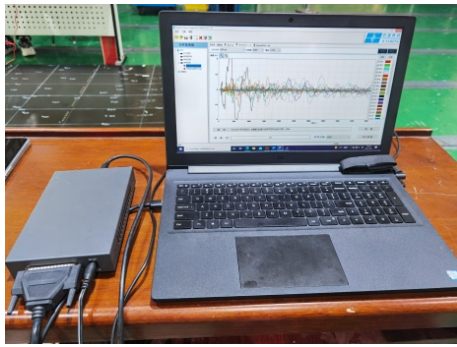


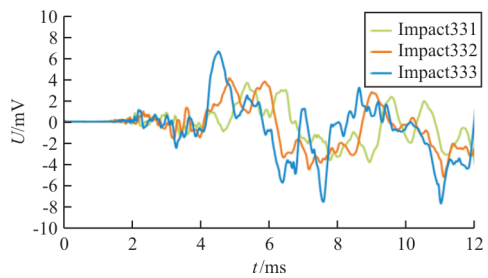
图 3 压电信号采集设备

Fig. 3 Piezoelectric signal acquisition equipment

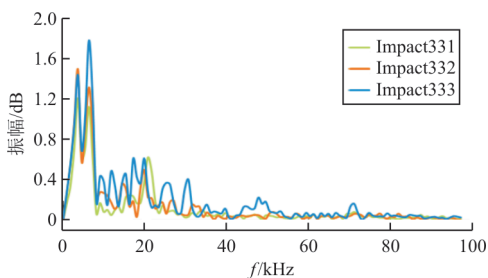
将冲击点分为三类, I 类冲击点位于单蒙皮区域, II 类位于长桁的中心点, III 类位于加强框处, 如图 1 所示。试验前将各冲击点位置在试验件上清楚标注, 便于试验过程中使用冲击头确定冲击位置, 每个点重复进行 3 次冲击, 确保所采集到的信号的准确性。

### 2.2 冲击信号处理

在单蒙皮处 (Impact331)、长桁处 (Impact332) 和加强框处 (Impact333) 冲击时同一传感器采集到的时域信号如图 4 所示。对单蒙皮区域 (Impact331) 采集信号进行连续复数 Morlet 小波变换, 提取中心频率为 10 kHz 的窄带 Lamb 波信号, 如图 5 所示。



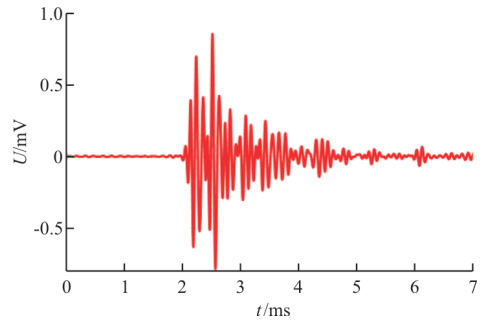
(a) 时域信号



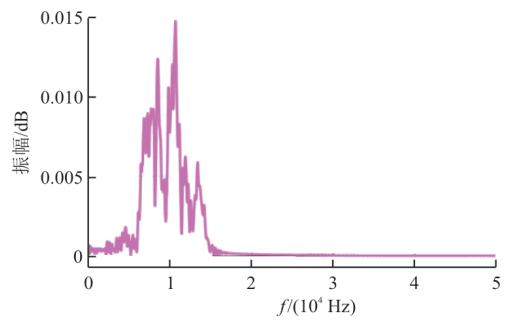
(b) 频域信号

图 4 Lamb 波冲击响应信号和频谱

Fig. 4 Impact device Lamb wave impulse response signal and spectrum



(a) 小波变换提取时域信号



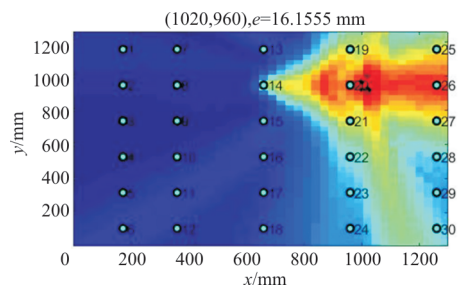
(b) 小波变换提取频域信号

图 5 Impact331 冲击点小波变换提取的中心频率为 10 kHz 的窄带 Lamb 波信号

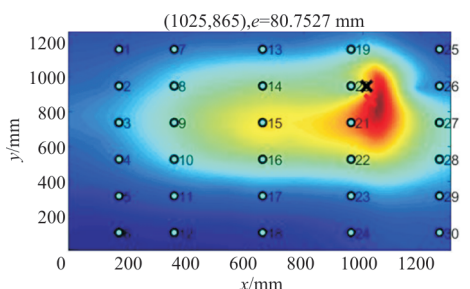
Fig. 5 The Lamb wave signal with a center frequency of 10 kHz extracted by Morlet transform on Impact331

### 2.3 试验结果

分别对三种类型的冲击点进行定位识别, 试验结果如图 6 所示。



(a) 时间反转聚焦算法



(b) 误差函数算法

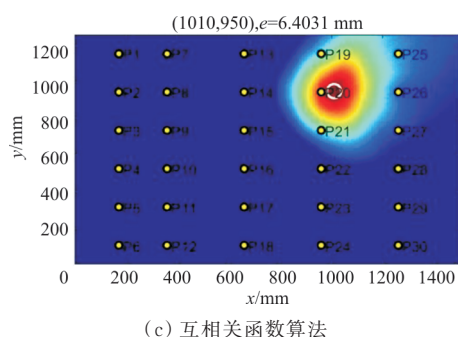


图 6 (1 014, 945)冲击位置的定位结果  
Fig. 6 Result of impact position (1 014, 945)

比较三种方法在每种类型冲击部位下的误差,分析其优劣性。误差计算方法为

$$e = \sqrt{(x_{\text{cal}} - x_{\text{real}})^2 + (y_{\text{cal}} - y_{\text{real}})^2} \quad (5)$$

式中: $x_{\text{real}}$ 、 $y_{\text{real}}$ 为冲击位置的真实坐标值; $x_{\text{cal}}$ 、 $y_{\text{cal}}$ 为应用算法计算出的冲击点坐标值。

使用三种算法分别对三类冲击点的定位结果如图 7 所示,可以看出:三类冲击点的误差为 I 类冲击点 < III 类冲击点 < II 类冲击点,单蒙皮区域的定位误差最小,长桁位置误差最大。结合大壁板的结构分析,长桁位置应力波的传播发生模式变化,改变了应力波的群速度,造成算法在此区域出现较大的定位误差。

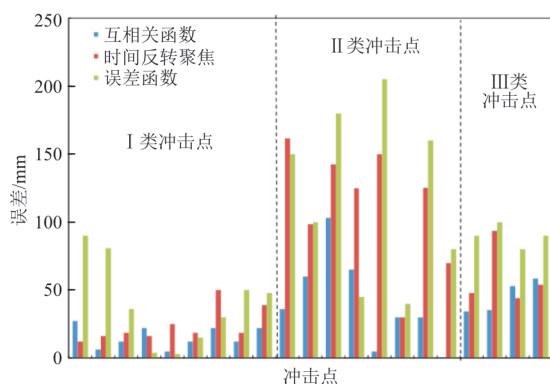


图 7 不同区域定位误差  
Fig. 7 Errors in different monitoring areas

在每个冲击区域比较三种算法的定位误差,可以看出:互相关函数算法 < 时间反转聚焦算法 < 误差函数算法。结合算法的自身特性,误差函数算法对信号测量精度要求较高,算法精度依赖于阈值设置,环境噪声或落锤冲击时试验设备的振动都会导致定位误差增大。时间反转聚焦算法在单蒙皮区域定位误差小,表明该试验件中复

杂结构对波速的影响直接影响了时间反转聚焦算法的定位精度。互相关函数算法在三类部位的平均误差均小于 50 mm,适用于复合材料复杂结构的冲击定位识别。

### 3 结 论

1) 三类冲击点的误差对比中,单蒙皮区域的定位误差最小,长桁位置误差最大。

2) 在每个冲击区域比较三种算法的定位误差,可以看出,互相关函数算法 < 时间反转聚焦算法 < 误差函数算法。

3) 互相关函数算法在三类部位的平均误差均小于 50 mm,适用于复合材料复杂结构的冲击定位识别。

### 参 考 文 献

- [1] SAFRI S, SULTAN M, JAWAID M, et al. Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: a review [J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 133: 112-121.
- [2] TAN W, FALZON B G, CHIU L, et al. Predicting low velocity impact damage and compression-after-impact (CAI) behaviour of composite laminates [J]. Composites Part A, 2015, 71: 212-226.
- [3] ZHU Kaige, QING Xinlin, LIU Bin. A two-step impact localization method for composite structures with a parameterized laminate model [J]. Composite Structures, 2018, 192: 500-506.
- [4] PENG Tao. Error-index-based algorithm for low-velocity impact localization [J]. Shock and Vibration, 2022, 112: 157-163.
- [5] 钟永腾, 袁慎芳, 邱雷. 基于梅花阵列的复合材料全方位冲击定位方法 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1369-1374.  
ZHONG Yongteng, YUAN Shenfang, QIU Lei. Omni-directional impact localization method on composite structure using plum blossom array [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1369-1374. (in Chinese)
- [6] SALEHIAN A. Identifying the location of a sudden damage in composite laminates using wavelet approach [D]. Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute, 2003.
- [7] JANG B W. Impact localization on a composite stiffened panel using reference signals with efficient training process [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 94: 271-285.
- [8] SHRESTHA P, KIM J H, PARK Y, et al. Impact localization on composite structure using FBG sensors and novel impact localization technique based on error outliers [J]. Composite Structures, 2016, 142: 263-271.
- [9] 陈淇, 史治宇, 张杰. 基于时频切片分解的时变系统参数识别 [J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 263-269.

- CHEN Qi, SHI Zhiyu, ZHANG Jie. Modal parameter identification of time-varying system based on time frequency slice decomposition[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 263-269. (in Chinese)
- [10] 邱雷, 袁慎芳, 苏永振, 等. 基于 Shannon 复数小波和时间反转聚焦的复合材料结构多源冲击成像定位方法[J]. 航空学报, 2010, 31(12): 2417-2424.
- QIU Lei, YUAN Shenfang, SU Yongzhen, et al. Multiple impact source imaging and localization on composite structure based on Shannon complex wavelet and time reversal focusing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(12): 2417-2424. (in Chinese)
- [11] 张宇, 岳桂轩, 李欣颖, 等. 基于互相关碰撞强度谱的航天器碰撞定位技术[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(1): 7-16.
- ZHANG Yu, YUE Guixuan, LI Xinying, et al. Impact positioning based on cross-correlation impact intensity map for spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(1): 7-16. (in Chinese)
- [12] 杨雷, 邓德双, 马书义, 等. 一种基于误差函数的结构冲击定位方法: CN114065487A[P]. 2022-02-18.
- YANG Lei, DENG Deshuang, MA Shuyi, et al. A structural impact location method based on error function: CN114065487A[P]. 2022-02-18. (in Chinese)
- [13] 李蒙, 张翠, 童杏林, 等. 基于 BP 算法和 FBG 传感的复合材料冲击定位检测技术[J]. 激光技术, 2022, 46(3): 320-325.
- LI Meng, ZHANG Cui, TONG Xinglin, et al. Composite material impact location detection technology based on BP algorithm and FBG sensing[J]. Laser Technology, 2022, 46(3): 320-325. (in Chinese)

#### 作者简介:

张 阳(1994—),女,硕士,工程师。主要研究方向:结构健康监测。

杨 宇(1980—),男,博士,研究员。主要研究方向:智能结构和结构健康监测。

齐 舸(1995—),男,硕士,工程师。主要研究方向:算法优化分析。

张 盛(1990—),男,硕士,工程师。主要研究方向:结构健康监测。

(编辑:马文静)

(上接第 84 页)

- FANG Ning, WANG Gu, WANG Baofa. Analysis of glint characters of complex coated target[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(3): 259-262. (in Chinese)
- [17] 刘小川, 张宇. 作战飞机关键结构易损性评估方法研究进展与展望[J]. 航空科学技术, 2021, 32(12): 43-56.
- LIU Xiaochuan, ZHANG Yu. Research progress and prospects of vulnerability assessment methods for key structures of combat aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12): 43-56. (in Chinese)
- [18] 冯顺山, 蒋浩征. 小药量爆炸冲击波对飞机毁伤效应的研究[J]. 兵工学报弹箭分册, 1987, 1(1): 17-25.
- FENG Shunshan, JIANG Haozheng. Study on the damage effect of small explosive blast wave on aircraft[J]. Journal of Military Industry: Bullet and Arrow Volume, 1987, 1(1): 17-25. (in Chinese)
- [19] 征惠玲. F-35 作战能力综述[J]. 国防科技, 2013, 34(2): 51-54.
- ZHENG Huiling. Overview of F-35 combat capability [J]. National Defense Technology, 2013, 34(2): 51-54. (in Chinese)

#### 作者简介:

刘丰军(1965—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:靶机总体论证等。

赵 阳(1991—),男,学士,工程师。主要研究方向:靶机总体设计,试验试飞。

张 丽(1974—),女,学士,高级工程师。主要研究方向:靶标发展、靶标测控及数据分析。

(编辑:马文静)

(上接第 109 页)

- MEI Haijun. Research on adaptive fuzzy PID control of semi-active air suspension[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] 兰文奎, 李仕生. 半主动悬架系统模糊 PID 控制器设计及仿真[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 148-151.
- LAN Wenkui, LI Shisheng. Design and simulation of fuzzy PID controller for semi-vehicle active suspension system [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2015, 34(2): 148-151. (in Chinese)
- 作者简介:
- 任潘婷(1998—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞机结构动力学,智能控制算法等。
- 许 锋(1964—),男,博士,副教授。主要研究方向:起落架设计,结构动力学反问题辨识,飞机冲击动力学辨识,系统仿真及振动控制技术。

(编辑:丛艳娟)