# 基于导波-高斯混合模型蒙特卡罗 迁移度量的结构损伤定量化诊断 方法研究



袁慎芳,王劼,徐秋慧,陈健

南京航空航天大学 航空航天机械结构力学及控制全国重点实验室, 江苏 南京 210016

摘 要:在线准确定量诊断飞行器结构疲劳裂纹损伤对于保证结构安全、降低维护费用具有重要意义,为了提升复杂服役条件环境下结构损伤定量化诊断的可靠性,本文提出了一种导波-高斯混合模型(Gaussian mixture model,GMM)蒙特卡罗 迁移度量的损伤定量化诊断方法。首先建立表征结构不同状态下导波特征概率分布的GMM,再通过大数据随机采样的 蒙特卡罗方法计算监测状态GMM 相对于基准GMM 的迁移距离,该方法在避免了复杂积分计算的同时,能够更准确地计 算GMM 的迁移距离,实现复杂服役条件下损伤扩展的准确定量化追踪诊断。选取重要飞行器耳片连接结构进行了孔边 裂纹监测,有效实现了裂纹定量化监测,结果表明,相比传统的最小匹配迁移距离计算方法,本文提出的方法使裂纹定量 化精度提高了29%。

关键词:导波结构健康监测; 高斯混合模型; 损伤定量化诊断; 迁移距离

### 中图分类号:TB553

文献标识码:A

疲劳裂纹的存在和扩展严重削弱结构的承载能力和 抗腐蚀能力,同时其突然断裂会导致灾难性事故的发 生<sup>[1]</sup>。飞行器结构所承受的复杂随机分布以及严峻的服 役环境条件容易引起结构的疲劳失效,尤其是一些应力集 中部位,如连接耳片部位、机翼大梁减重孔等。飞机损伤 容限设计准则允许结构件中存在裂纹,可以使用结构健康 监测(structural health monitoring,SHM)技术对裂纹进行监 测,使其不会扩展到足以引起结构破坏的程度。因此通过 SHM技术对飞行器结构的疲劳裂纹扩展进行准确量化, 对保障飞行器结构的安全性、降低飞行器维护费用具有重 要意义。

在诸多SHM技术中,近年来基于主动导波的损伤检测技术因其具有小损伤敏感、能实现区域监测等优点,受

#### DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2023.03.005

到越来越多的关注和长足的发展,并在SHM中显示出巨大的应用潜力<sup>[2]</sup>。然而,在飞行器的实际服役过程中,由于动态载荷、温度变化等时变因素对导波传播的影响,所提取的损伤特征也随时变条件的变化呈现一定的不确定性,这给准确监测与预测损伤状态带来了挑战。目前,GMM已经验证了在解决复杂时变服役条件下损伤诊断的可行性和有效性。如Qiu Lei等<sup>[3]</sup>提出了一种GMM的在线更新损伤评估方法,并在飞机重要的承载结构翼梁上验证了其有效性;Xu Qiuhui等<sup>[4]</sup>提出了一种多源特征融合的GMM方法,在典型飞机梁结构上验证了该方法对损伤的在线量化效果。上述研究中,主要通过计算GMM的迁移距离来定量表征损伤程度,从而实现结构损伤定量诊断。KL 散度(kullback-leibler divergence, KLD)就是一种常用

## 收稿日期: 2022-10-28; 退修日期: 2023-01-06; 录用日期: 2023-02-01

- 基金项目:国家自然科学基金(51921003,52275153,52205160);机械结构力学及控制国家重点实验室(南京航空航天大学)自主研究课题(MC-MS-I-0521K01);江苏高校优势学科建设工程资助项目
- 引用格式: Yuan Shenfang, Wang Jie, Xu Qiuhui, et al. Research on quantitative diagnosis method of structural damage based on guided wave-Gaussian mixture model Monte Carlo migration measurement[J].Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(03):33-39. 袁慎芳, 王劼, 徐秋慧, 等. 基于导波-高斯混合模型蒙特卡罗迁移度量的结构损伤定量化诊断方法研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34 (03):33-39.

的迁移距离。然而两个GMM之间的KL散度没有解析 解,因此只能近似求解。

Thomas等<sup>[5]</sup>首先提出将求两个GMM之间的KL散度 转化成求解两个高斯分布间的KL散度的思想。 Vasconcelos等<sup>[6]</sup>在此基础上,提出一种基于高斯分量间的 最小匹配的方法来近似KL散度。最小匹配法原理简单、 易于实现,且在对精度要求不高的情况下能够实现KL散 度的近似,因此最小匹配法是目前导波-SHM领域中KL 散度近似的典型方法,如参考文献[3]和文献[4]的研究中 采用的都是最小匹配法。然而最小匹配法相当于将混合 模型中多个高斯分量简单加权求和退化成单高斯分布模 型,可能会导致对样本概率分布表征的不准确。除此之 外,Goldberger等<sup>[7]</sup>提出用无迹变换法从GMM的多峰分布 中采样少量、确定的sigma点并求其均值来近似KL散度。 但无迹变换法忽略了二阶项以上的高阶信息,近似精度有 限。如何提高GMM结构损伤定量化中KL散度的计算精 度,亟须进一步研究。

因此,本文提出了一种基于导波-GMM蒙特卡罗迁移 度量的结构损伤定量化诊断方法。该方法考虑到计算两个 GMM之间的KL散度重点在于求解不定积分,所以从 GMM模型的整体出发,采用蒙特卡罗随机采样法将求积分 问题转化为求采样点的期望,主要以随机采样的方式从基 准GMM概率分布中进行采样,每次根据高斯分量的权值 随机选择其对应的某一高斯分量,然后通过随机采样获得 样本点,组成样本点集,最终将KL散度的计算问题转化为 求取采样点期望的问题。本文所提出的方法在避免复杂积 分计算的同时,能更准确计算GMM的迁移距离,实现复杂 服役条件下损伤扩展的准确定量化追踪诊断。在此基础 上,进一步选取重要飞行器耳片连接结构进行了孔边裂纹 监测,对本文提出的方法进行了验证。

## 1 导波-GMM蒙特卡罗迁移度量的结构损伤 定量化诊断方法

## 1.1 二维损伤特征提取

本文所提出的基于导波-GMM蒙特卡罗迁移度量的 结构损伤定量化诊断方法的基础是导波结构健康监测方 法,其基本思想是通过压电传感器在结构中激励超声应力 波(导波),然后通过另外的传感器接收导波信号,当结构 中萌生或者发生裂纹扩展时,导波信号传播特征发生变 化,通过提取导波信号的变化,可以实现结构损伤定量化 诊断。 因而提取反映信号在损伤前后变化的特征参数是该 方法的一个重要环节。在诸多损伤识别技术中,损伤因子 (damage index,DI)法可以定量描述导波信号随裂纹损伤 扩展的变化情况。本文主要研究归一化互相关矩损伤因 子η<sub>1</sub>和差信号能量损伤因子η<sub>2</sub>

$$\eta_{1} = \frac{\int_{t_{1}}^{t_{2}} \tau^{2} \left| r_{H(t)D(t)}(t) \right| \mathrm{d}t - \int_{t_{1}}^{t_{2}} \tau^{2} \left| r_{H(t)H(t)}(t) \right| \mathrm{d}t}{\int_{t_{1}}^{t_{2}} \tau^{2} \left| r_{H(t)H(t)}(t) \right| \mathrm{d}t}$$
(1)

$$\eta_2 = \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} |D(t) - H(t)|^2 dt} / \int_{t_1}^{t_2} |H(t)|^2 dt$$
(2)

其中

$$r_{H(t)D(t)}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(t)D(t-\tau)\mathrm{d}t$$
(3)

$$\mathcal{F}_{H(t)H(t)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(t)H(t-\tau)\mathrm{d}t$$
(4)

式中,*t*<sub>1</sub>和*t*<sub>2</sub>为用于计算损伤因子截取的信号段的起止时间,*H*(*t*)和*D*(*t*)分别表示健康基准信号和获取的监测信号。

### 1.2 导波-GMM基本原理

GMM已被证明是一种模拟复杂的导波特征概率分布的有效方法,是机器学习的典型算法之一。

在时变条件下,连续获取 R 个导波特征 X,组成导波信 号特征样本集 X,记  $X=[X_1, X_2, \cdots, X_r, \cdots, X_R]$ 。其中, $X_r$ ,是 d维导波特征矢量,X是由这些矢量构成的  $d \times R$  维矩阵。导 波特征  $X_r = [\eta_1, \eta_2]^T$ ,由上文提到的归一化互相关矩和差信 号能量二维损伤因子组成。由于受复杂时变因素的影响, 导波特征  $X_r$ ,近似服从 GMM 分布,其概率密度函数表达 式为

$$f = \sum_{i=1}^{C} w_i f_i \tag{5}$$

$$f_{i} = (2\pi)^{-\frac{d}{2}} \sum_{i} \left| \sum_{i=1}^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2} (\mathbf{x}_{i} - \mu_{i})^{\mathsf{T}} \boldsymbol{\Sigma}_{i}^{-1} (\mathbf{x}_{i} - \mu_{i})} \right|$$
(6)

式中,C表示 GMM 中高斯分量的个数, $i=1,2,\dots,C,\mu_i,\Sigma_i$ 表示 第i个高斯分量的均值和协方差矩阵。 $w_i$ 表示第i个高斯分量的权值,且所有权值之和为1。

GMM 的参数一般通过期望最大化(expectationmaximization, EM)算法迭代求解,而EM算法的迭代结果 依赖其初始值的设置,本文采用均匀初始化方法来初始化 GMM的参数<sup>[8]</sup>。

#### 1.3 导波-GMM蒙特卡罗迁移度量原理

在结构健康状态或者裂纹扩展的早期,损伤的缓慢累积特性将使两个GMM重叠在一起。然而,随着损伤的扩展,两个GMM将逐渐分离。因此可以通过度量监测GMM 与基准GMM之间的迁移距离,实现结构损伤定量化判别。

本文通过计算监测 GMM 和基准 GMM 之间的 KL 散度值来 度量 GMM 之间的迁移距离 D<sub>KL</sub>

$$D_{\rm KL}(f^0 || g^n) = \int f^0 \log \frac{f^0}{g^n} dx = E_{\chi, f^0} \left[ \log \frac{f^0}{g^n} \right]$$
(7)

式中, f<sup>0</sup>和g"分别是基准GMM和第n次监测GMM的概率 密度函数。

如式(7)所示,KL散度实际上是两个分布的信息量差的期望。基于大数定律的用均值近似期望的思想,蒙特卡罗方法指出可以用随机采样的采样点{x<sub>l</sub>}<sub>l=1</sub>的信息量差的均值来近似期望<sup>[9]</sup>,即

$$D_{\mathrm{KL}}(f^{0} \parallel g^{n}) = E_{\boldsymbol{x} \neq \boldsymbol{y}}\left[\log \frac{f^{0}}{g^{n}}\right] \approx \frac{1}{N} \sum_{l=1}^{N} \log \frac{f^{0}(\boldsymbol{x}_{l})}{g^{n}(\boldsymbol{x}_{l})}$$
(8)

采样点数N足够大时,可以很好地逼近真实的KL散 度值。

#### 1.4 导波-GMM蒙特卡罗迁移度量流程

基于上述导波-GMM蒙特卡罗迁移度量原理,给出了 导波-GMM蒙特卡罗迁移度量方法流程,分为以下6部分。

(1)输入参数设置:输入以下参数,总采样点数*N*;基准 GMM参数(高斯分量个数*C*<sup>0</sup>、权值*w*<sup>0</sup>={*w*<sub>i</sub><sup>0</sup>};<sup>*C*<sup>0</sup></sup><sub>i=1</sub>、均值*µ*<sup>0</sup>={*µ*<sub>i</sub><sup>0</sup>}  $\sum_{i=1}^{c^{0}}$ 、协方差 $\Sigma^{0}=\{\Sigma_{i}^{0}\}_{i=1}^{c^{0}}$ );监测GMM参数(高斯分量个数*C*<sup>n</sup>、 权值*w*<sup>n</sup>={*w*<sub>i</sub><sup>n</sup>};<sup>*C*</sup><sub>i=1</sub>、均值*µ*<sup>n</sup>={*µ*<sub>i</sub><sup>n</sup>};<sup>*C*</sup><sub>i=1</sub>、协方差 $\Sigma^{n}=\{\Sigma_{i}^{n}\}_{i=1}^{c^{0}}$ )。

(2)计算采样点数目:蒙特卡罗法以随机采样的方式从 基准GMM概率分布f<sup>0</sup>中总共采样N个样本点,每次以第*i* 个高斯分量的权重w<sup>0</sup><sub>i</sub>从该分量中随机采样N<sub>i</sub>个样本点,N<sub>i</sub> 由式(9)计算。floor表示当N<sub>i</sub>为小数时,取不大于本身的最 小整数。

$$N_i = \text{floor}\left(w_i^0 \times N\right) \tag{9}$$

(3)计算采样点坐标:采样点的坐标由同一裂纹长度下 不同种类的损伤因子构成的矢量*x*=[η<sub>1</sub>,...,η<sub>d</sub>]组成,根据式 (10)计算从第*i*个高斯分量中随机采样的*N<sub>i</sub>*个样本点的坐 标{*x<sub>i</sub>*}<sup>*Ni*</sup>,其中*l*表示从第*i*个高斯分量中采样点的序号

$$\boldsymbol{x}_{i,l} = \boldsymbol{\mu}_i^0 + \left( \text{rand} \times \sqrt{\boldsymbol{\Sigma}_i^0} \right)$$
(10)

(4)计算采样点在基准 GMM 和监测 GMM 中概率比的 对数:由式(11)计算从第*i*个高斯分量中随机采样的第*l*个 样本点的坐标在基准 GMM 和监测 GMM 中概率比的对数, 并由式(12)计算从第*i*个高斯分布中随机采样的所有样本 点的概率比的对数和

$$r(\boldsymbol{x}_{i,l}) = \log \frac{f^0(\boldsymbol{x}_{i,l})}{g^n(\boldsymbol{x}_{i,l})}$$
(11)

$$sum(i) = \sum_{i=1}^{C^{\circ}} \sum_{l=1}^{N_{i}} r(\mathbf{x}_{i,l})$$
(12)

(5)判断是否采样结束:根据采样点数是否达到N<sub>i</sub>判断 是否已经完成了所有基准高斯分量中的采样,如果没有,则 进入下一个基准高斯分布中采样并回到步骤(3),否则进入 步骤(6)。

(6)输出KL距离:最后,根据式(13)将KL散度的计算问题转化为求取采样点均值的问题,输出近似KL距离DKL

$$D_{\rm KL}(f^0 || g^n) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{C^0} \sum_{l=1}^N \log \frac{f^0(\mathbf{x}_{i,l})}{g^n(\mathbf{x}_{i,l})} = \frac{{\rm sum}(i)}{N}$$
(13)

导波-GMM蒙特卡罗迁移度量方法流程如图1所示。



图1 导波-GMM蒙特卡罗迁移度量方法流程

Fig.1 Flow chart of guided wave-GMM Monte Carlo migration measurement method

## 1.5 基于导波-GMM蒙特卡罗迁移度量的结构损伤定量化 诊断流程

基于导波-GMM蒙特卡罗迁移度量的结构损伤定量 化诊断的总体流程主要可分为两大过程:(1)离线标定过 程;(2)在线监测过程。

对于训练件的离线标定,首先需要提取训练件处于健康状态下的基准信号特征样本集,建立与基准特征样本集 对应的基准GMM模型。随后,提取a(单位为mm)裂纹长 度下导波监测特征样本集,并训练监测GMM。进一步计算 a 裂纹长度下监测 GMM 与基准 GMM 之间的迁移距离,获 取不同裂纹长度及迁移距离数据集。最终构建迁移距离和 裂纹长度的标定模型。

对于测试件的在线监测,首先需要在测试件处于健康 状态下获取基准导波信号,提取信号损伤因子,构成基准信 号特征样本集,建立与基准特征样本集对应的基准GMM。 在线监测过程中,需要采集测试件信号并提取相应的损伤 因子,更新形成监测信号特征样本集及相应的监测GMM 模型。用蒙特卡罗法度量监测GMM与基准GMM之间的 迁移距离,将迁移距离输入训练件构建的标定模型中,可实 时输出裂纹长度。

## 2 蒙特卡罗-GMM方法的试验验证

为验证本文提出的导波-GMM蒙特卡罗迁移度量结构损伤定量化方法的有效性,选取重要飞行器耳片连接结构进行了孔边裂纹监测,有效实现了裂纹定量化监测。

## 2.1 试验设置

根据《美国空军耳片损伤容限分析指南》<sup>[10]</sup>,设计耳片 结构试件如图2所示。试件采用5mm厚的LY12铝合金板 线切割得到,其尺寸如图3所示。在通孔的一侧通过线切 割预制2mm长的穿透切口,用于引导裂纹起裂和裂纹扩 展方向。该切口的宽度为0.7mm。此外,在试件表面采用 共固化的方法布置压电传感器网络以监测疲劳裂纹的扩 展。由于裂纹扩展方向垂直于传感器监测网络的PZT1-3 通道,因此本文重点分析此传感通道的典型导波信号及其 损伤因子。此处,PZT1-3表示1号传感器激励信号、3号 传感器接收信号。共设计制备了5件批量耳片试件,分别 记为T1—T5。

在疲劳试验中,采用MTS810电液伺服加载系统施加 疲劳载荷,如图4所示。使用如图5所示的随机载荷谱进 行疲劳裂纹扩展加载,以该载荷谱为基本谱块,设定加载 频率为10Hz,对耳片试验件进行循环加载。

加载过程中,通过裂纹扩展路径上的刻度以及数码显 微镜观测疲劳裂纹的长度,且每隔10s激励和采集一次导 波信号。导波信号的激励采集设备为作者所在课题组研 发的压电多通道结构健康监测扫查系统。激励信号采用 三波峰正弦调制信号,中心频率为170kHz,幅值为±70V。 导波信号采样率为20MHz。在该激励中心频率下,只在 结构中激发S0模式和A0模式,并且S0模式和A0模式经 过上述传感器间距后不发生混叠。









图3 传感器网络的布置(单位:mm)

Fig.3 Sensor network layout(Unit:mm)



图 4 耳片结构试件的疲劳试验设置 Fig.4 Fatigue test setting of lug structure specimen

#### 2.2 二维损伤特征提取

以裂纹未扩展时采集的前10个信号取平均作为基准 信号,计算归一化互相关矩和差信号能量损伤因子得到图 6所示的结果。

## 2.3 蒙特卡罗-GMM迁移距离标定模型

根据上述试件T1—T5的试验数据,采用留一法进行验



Fig.6 Variation diagram of damage index with crack length

证:其中1个试件作为测试试件用于验证裂纹监测标定模型,其余4件试件的数据用于训练标定模型。

在前期预试验中发现,在规定诊断时间内,采样点数*N* 到达10000后,精度提升的效果并不是太明显。因此本试 验蒙特卡罗采样点数*N*取10000。

图6中试件T1和试件T5损伤因子偏离总体,因此下面 主要分析这两件作为测试试件的诊断结果。

当选取试件T1为测试件训练得到的迁移距离和裂纹

长度关系的标定模型的结果如图7(a)的蓝线所示。试件 T1在对应KL距离下的实际裂纹长度如图7(a)的黑色实心 点所示。同样地以试件T5作为测试件的裂纹定量化诊断 结果如图7(b)所示。





## 2.4 GMM 定量化诊断结果分析

本文以传统的导波-GMM最小匹配迁移距离计算方 法为对比项。同时为了对比两种不同GMM迁移距离计 算方法的耳片结构损伤定量化诊断的精度,引入了最大绝 对误差 e<sub>max</sub>和均方根误差 e<sub>RMSE</sub>指标。表1为试件为T1/T5 时,导波-GMM最小匹配迁移距离计算方法和本文所提 导波-GMM蒙特卡罗迁移距离计算方法的诊断精度 对比。

## 表1 不同方法计算 KL距离损伤定量化评估结果

Table 1 Quantitative assessment results of KL distance damage calculated by different methods

误差指标	迁移方法	T1	Т5	平均值
e <sub>max</sub> /mm	蒙特卡罗	0.84	0.95	0.90
	最小匹配	1.05	1.12	1.08
e <sub>RMSE</sub> /mm	蒙特卡罗	0.34	0.65	0.50
	最小匹配	0.67	0.73	0.70
注:从epasse来看,裂纹定量化精度提高了(0.70-0.50)/0.70=29%				

由表1可以看出,在两组不同测试条件下,本文所提 蒙特卡罗方法均优于常规最小匹配方法。将各个评估误差 求平均,最小匹配法的最大绝对误差和均方根误差分别为 1.08mm、0.70mm,本文所提蒙特卡罗法的最大绝对误差和 均方根误差分别为0.90mm、0.50mm。因此相比于传统的 最小匹配迁移距离计算方法,本文提出的方法使均方根误 差下降了0.20mm,即裂纹定量化精度提高了29%。

## 3 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)本文提出了一种基于导波-GMM蒙特卡罗迁移度 量的结构损伤定量化诊断方法,实现了GMM损伤定量化, 提高了结构损伤定量化诊断精度。

(2)选取重要飞行器耳片连接结构进行了孔边裂纹监测,试验结果表明,本文提出的方法使裂纹定量化精度提高了29%,因此有效实现了裂纹定量化监测。

本文所提出方法的基础是导波结构健康监测技术,通 过识别在结构中传播的导波信号变化实现损伤诊断,因此 不仅仅适用于本文所验证的重要耳片连接结构,对飞行器 结构过孔、铆钉连接部件、混杂连接、几何过渡区域等部位 的裂纹损伤都可以实现监测,在不同种类的飞行器关键结 构损伤定量化诊断中都表现出很好的诊断精度。并且在全 机疲劳试验结果中也得到了相应验证<sup>[11]</sup>,表明本文所提出 模型具有优秀的泛化能力。

然而,导波-GMM方法模型构建过程中高斯分量数不 可变,导致不能根据样本分布的变化自适应地选取合适的 高斯分量数。今后将进一步研究如何在监测过程中,根据 样本的分布实现自适应确定高斯分量数目,为准确构建导 波-GMM提供更加智能的解决方法。

### 参考文献

- [1] Chen Jian, Yuan Shenfang, Qiu Lei. On-line prognosis of fatigue crack propagation based on Gaussian weight-mixture proposal particle filter [Z]. Ultrasonics, 2017.
- [2] 鲍峤,邱雷,袁慎芳.飞行器结构健康监测中压电一导波成像 技术的发展与挑战[J]. 航空科学技术,2020,31(3):15-33.
   Bao Qiao, Qiu Lei, Yuan Shenfang. Development and challenge of piezoelectric guided wave imaging technology in aircraft structural health monitoring[J]. Aeronautical Science &

Technology, 2020, 31 (3): 15-33. (in Chinese)

- [3] Qiu Lei, Yuan Shenfang, Chang Fukuo, et al. On-line updating Gaussian mixture model for aircraft wing spar damage evaluation under time-varying boundary condition[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12): 125001.
- [4] Xu Qiuhui, Yuan Shenfang, Huang Tianxiang. Multidimensional uniform initialization gaussian mixture model for spar crack quantification under uncertainty[J]. Sensors, 2021, 21(4):1283.
- [5] Thomas M C, Joy A T. Elements of information theory[M]. Wiley-Interscience, 2006: 13-25.
- [6] Vasconcelos N. On the complexity of probabilistic image retrieval[C]//Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001. IEEE, 2001.
- [7] Jacob G, Shiri G, Hayit G. An efficient image similarity measure based on approximations of KL-divergence between two gaussian mixtures[C]//ICCV,2003.
- [8] Zhang Jinjin, Yuan Shenfang ,Chen Jian. Guided wave-hidden Markov model for on-line crack evaluation of a full-scale aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 117: 106976.
- [9] Tiffany M S, Theodore B. A monte carlo evaluation of growth mixture modeling[J]. Development and Psychopathology, 2021, 15: 1-14.
- [10] 刘雪惠,罗安民,张相周.美国空军耳片损伤容限分析指南
   [R].航空航天部《AFFD》系统工程办公室,1988.
   Liu Xuehui, Luo Anmin, Zhang Xiangzhou. Guide to analysis of earpiece damage tolerance of US air force [R]. AFFD Systems Engineering Office, 1988. (in Chinese)
- [11] Fang Fang, Qiu Lei, Yuan Shenfang, et al. Dynamic probability modeling-based aircraft structural health monitoring framework under time-varying conditions: Validation in an inflight test simulated on ground[J]. Aerospace science and technology, 2019, 95:105467.

# Research on Quantitative Diagnosis Method of Structural Damage Based on Guided Wave-Gaussian Mixture Model Monte Carlo Migration Measurement

## Yuan Shenfang, Wang Jie, Xu Qiuhui, Chen Jian

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

**Abstract:** On-line quantitative diagnosis of fatigue crack damage of aircraft structure is of great significance to ensure structural safety and reduce maintenance cost. In order to improve the reliability of quantitative diagnosis of structural damage under complex service conditions, this paper proposes a damage quantitative diagnosis method based on guided wave-Gaussian Mixture Model (GMM) Monte Carlo migration metric. Firstly, GMM is established to characterize the probability distribution of guided wave characteristics in different states of the structure, and then the migration distance of GMM in the monitored state is calculated by Monte Carlo method of random sampling of big data. This method can not only avoid complex integral calculation, but also calculate the migration distance of GMM more accurately, and realize the quasi-definite quantitative tracking diagnosis of damage propagation under complex service conditions. The crack at the hole edge is monitored by selecting an important aircraft lug connection structure, and the quantitative monitoring of crack is effectively realized. The results show that compared with the traditional calculation method of minimum matching migration distance, the quantitative accuracy of crack is improved by 29% by the proposed method.

**Key Words:** guided wave structure health monitoring; Gaussian mixture model; quantitative diagnosis of injury; migration distance

Received: 2022-10-28; Revised: 2023-01-06; Accepted: 2023-02-01

**Foundation item**: National Natural Science Foundation of China (51921003, 52275153, 52205160); Research Fund of State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (MCMS-I-0521K01); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions of China