

引用格式:王龙,段静波,路平.基于模态参数的轻质高强机翼梁结构损伤识别研究[J].电光与控制,2017,24(8):91-95,108. WANG L, DUAN J B, LU P. Modal parameters based damage identification of light-weight high-strength wing beam structure[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(8): 91-95, 108.

## 基于模态参数的轻质高强机翼梁结构损伤识别研究

王 龙, 段静波, 路 平  
(军械工程学院无人机工程系, 石家庄 050003)

**摘 要:**提出了一种适用于轻质高强梁结构的损伤识别方法。针对附加质量的频率灵敏度方法在轻质高强梁结构损伤检测中出现的定位干扰问题,将结构的模态振型与应变能相结合,提出一种可利用结构应变能排除损伤定位干扰的损伤识别方法,并分别进行了数值仿真和实验验证。结果表明,该方法兼具了附加质量频率灵敏度法和应变能法在损伤识别中的优点,可以较为精准地识别轻质高强梁结构中的损伤位置和损伤程度。

**关键词:**无人机; 梁结构; 损伤识别; 轻质高强; 频率灵敏度; 附加质量

**中图分类号:** TU323.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.08.019

## Modal Parameters Based Damage Identification of Light-Weight High-Strength Wing Beam Structure

WANG Long, DUAN Jing-bo, LU Ping

(Department of UAV Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** A damage identification method is proposed, which is suitable for light-weight, high-strength beam structure. Aiming at the problem of positioning interference in the frequency sensitivity method of additional mass for use in the light-weight, high-strength structural damage detection, we combined the modal vibration of the structure with the strain energy, and proposed a damage identification method, which could eliminate the damage location disturbance by using the structural strain energy. Numerical simulation and experimental verification were carried out respectively. The results show that the method has the advantages of both the frequency sensitivity method and the strain energy method in damage identification, and the damage location and damage degree can be identified more precisely.

**Key words:** UAV; beam structure; damage identification; light-weight high-strength; frequency sensitivity; additional mass

### 0 引言

随着航空工业技术的进步,轻质高强结构在无人机机翼上得到了大量应用,然而在环境腐蚀、冲击载荷等因素作用下,机翼会逐渐产生细微损伤,随着时间增长,损伤会逐渐累积,从而可能引发极大的安全隐患和意外事故。因此,对结构进行损伤识别一直是国内外研究的热点。自1984年WEST<sup>[1]</sup>提出利用结构的模态参数变化进行损伤检测,特别是1995年STUBBS<sup>[2]</sup>提

出基于模态振型的应变能变化来检测结构损伤,由于方法简单、物理意义明确,受到了国内外研究学者的广泛关注。STUBBS等人直接将应变能作为损伤指数,并用于梁结构损伤数值模拟,能够较好地识别结构损伤位置。LIM<sup>[3]</sup>等人和DOEBLING<sup>[4]</sup>等人利用模态应变能对结构进行损伤检测定位。SHI<sup>[5]</sup>等人通过结构损伤前后应变能变化构建损伤指标,能够检测到复杂结构损伤位置。郭惠勇<sup>[6-7]</sup>等人基于模态应变能,对不同的损伤指标进行了对比分析和研究。目前单独利用结构固有频率对结构进行损伤程度识别也是结构损伤研究的热点<sup>[8]</sup>,MESSINA<sup>[9]</sup>等人提出了频率灵敏度方程,利用结构损伤前后固有频率变化能够较好地识别结构损伤程度。杨秋伟<sup>[10-14]</sup>等人利用结构模态参数,对结构损伤识别做了大量的研究,并取得了显著的成果,通过在对称结构上添加质量块,基于频率灵敏度和

收稿日期:2016-08-26

修回日期:2016-09-07

基金项目:中国人民解放军装备维修科学研究与改革(WG2015ZT120003)

作者简介:王 龙(1992—),男,甘肃陇西人,硕士生,研究方向为机体结构损伤检测。

柔度灵敏度建立损伤方程,损伤识别定位效果良好。薛松涛<sup>[15]</sup>等人通过测量结构的固有频率变化,利用频率灵敏度可以确定结构的损伤位置。

基于附加质量的频率灵敏度法可以较好地识别结构损伤。但是,对于轻质高强结构而言,由于结构质量轻,会在损伤位置对称处出现损伤信息干扰,影响损伤识别的准确性。而在研究中发现,基于模态应变能法进行损伤识别时,损伤定位非常准确而对损伤程度的识别不如附加质量频率灵敏度法。因此,本文将机翼结构简化为梁结构,提出一种将结构模态振型和模态应变能相结合的损伤识别方法,以解决在进行轻质高强结构损伤识别时遇到的问题。

## 1 基本理论

### 1.1 附加质量的频率灵敏度法

基于结构固有频率的损伤检测方法有着诱人的应用前景。对于轻质高强结构而言,当基于灵敏度损伤方程进行结构损伤检测时,结构固有频率高、测量精度差,导致结构损伤检测存在一定误差。可以通过在结构上附加质量块来改变结构模态参数,有效降低损伤识别误差<sup>[16-18]</sup>。

将无阻尼线性结构离散成  $N$  单元,附加质量前后结构振动特征值方程可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i = \lambda_i \mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_i \\ \mathbf{K}\boldsymbol{\phi}_i^m = \lambda_i^m (\mathbf{M} + \mathbf{M}^m) \boldsymbol{\phi}_i^m \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{K}$  分别为系统的质量矩阵和刚度矩阵;  $\mathbf{M}^m$  为附加质量组成的质量矩阵;  $\lambda_i, \boldsymbol{\phi}_i$  分别为附加质量前结构第  $i$  阶固有频率和模态振型;  $\lambda_i^m, \boldsymbol{\phi}_i^m$  分别为附加质量后结构第  $i$  阶固有频率和模态振型。

当结构发生损伤时,假设结构中每个单元的损伤程度参数为  $\gamma_j$ 。根据文献[11],附加质量前后,第  $i$  阶模态下固有频率的变化量  $\Delta\lambda_i, \Delta\lambda_i^m$  可以分别表示为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_i = \lambda_i^* - \lambda_i \\ \Delta\lambda_i^m = \lambda_i^{m*} - \lambda_i^m \end{cases} \quad (2)$$

利用泰勒级数展开,式(2)可以近似表示为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_i = \sum_{j=1}^N \gamma_j \frac{\partial \lambda_i}{\partial \gamma_j} \\ \Delta\lambda_i^m = \sum_{j=1}^N \gamma_j \frac{\partial \lambda_i^m}{\partial \gamma_j} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $N$  为结构单元总数;  $\frac{\partial \lambda_i}{\partial \gamma_j}$  为附加质量前第  $i$  阶固有频率对  $j$  单元损伤参数求偏导;  $\frac{\partial \lambda_i^m}{\partial \gamma_j}$  为附加质量后第  $i$  阶固有频率对  $j$  单元损伤参数求偏导。

模态分析中得到结构的前  $n$  阶模态参数,将附加

质量前后的损伤方程联合起来,则式(3)用矩阵形式表示为

$$\{\Delta\boldsymbol{\lambda}\} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^m \end{bmatrix} \{\boldsymbol{\gamma}\} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{S}$  为附加质量前的灵敏度矩阵;  $\mathbf{S}^m$  为附加质量后的灵敏度矩阵;  $\{\Delta\boldsymbol{\lambda}\}, \{\boldsymbol{\gamma}\}, \mathbf{S}, \mathbf{S}^m$  的具体表达式分别如下:  $\{\Delta\boldsymbol{\lambda}\} = (\Delta\lambda_1 \ \Delta\lambda_2 \ \cdots \ \Delta\lambda_n \ \Delta\lambda_1^m \ \Delta\lambda_2^m \ \cdots \ \Delta\lambda_n^m)$ ;

$$\{\boldsymbol{\gamma}\} = (\gamma_1 \ \gamma_2 \ \cdots \ \gamma_N)^T;$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_1}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial \lambda_1}{\partial \gamma_2} & \cdots & \frac{\partial \lambda_1}{\partial \gamma_N} \\ \frac{\partial \lambda_2}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial \lambda_2}{\partial \gamma_2} & \cdots & \frac{\partial \lambda_2}{\partial \gamma_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \lambda_n}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial \lambda_n}{\partial \gamma_2} & \cdots & \frac{\partial \lambda_n}{\partial \gamma_N} \end{bmatrix}; \mathbf{S}^m = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_1^m}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial \lambda_1^m}{\partial \gamma_2} & \cdots & \frac{\partial \lambda_1^m}{\partial \gamma_N} \\ \frac{\partial \lambda_2^m}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial \lambda_2^m}{\partial \gamma_2} & \cdots & \frac{\partial \lambda_2^m}{\partial \gamma_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \lambda_n^m}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial \lambda_n^m}{\partial \gamma_2} & \cdots & \frac{\partial \lambda_n^m}{\partial \gamma_N} \end{bmatrix}。$$

由式(4)计算出损伤参数值,即

$$\{\boldsymbol{\gamma}\} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}^+ \\ \mathbf{S}^{m+} \end{bmatrix} \{\Delta\boldsymbol{\lambda}\} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{S}^+$  为  $\mathbf{S}$  的广义逆;  $\mathbf{S}^{m+}$  为  $\mathbf{S}^m$  的广义逆。

### 1.2 模态应变能法

利用模态应变能变化对结构损伤检测定位较有效,刘晖<sup>[19]</sup>等人给出了结构损伤前后第  $i$  阶模态下  $j$  单元的模态应变能  $U_{ij}$  和  $U_{ij}^*$ ,具体表达式为

$$\begin{cases} U_{ij} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\phi}_i^T K_j \boldsymbol{\phi}_i \\ U_{ij}^* = \frac{1}{2} \boldsymbol{\phi}_i^{*T} K_j \boldsymbol{\phi}_i^* \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\boldsymbol{\phi}_i^*$  为结构损伤后第  $i$  阶模态振型。

构建简单的模态应变能变化指标<sup>[20-21]</sup>(Modal Strain Energy Change Index, MSECI)

$$\gamma_{ij}^* = \frac{U_{ij}^* - U_{ij}}{U_{ij}} \quad (7)$$

实际工程中,为了使检测效果明显,一般提取前  $n$  阶模态参数,每一阶模态参数下  $j$  单元都会有一个单元损伤指标,因此可以利用前  $n$  阶模态参数在同一个单元下损伤指标的平均值来描述损伤,定义为

$$\boldsymbol{\gamma}_j^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_{ij}^* \quad (8)$$

则基于应变能变化的损伤指标  $\{\boldsymbol{\gamma}^*\}$  为

$$\{\boldsymbol{\gamma}^*\} = (\boldsymbol{\gamma}_1^* \ \boldsymbol{\gamma}_2^* \ \cdots \ \boldsymbol{\gamma}_N^*)^T \quad (9)$$

### 1.3 综合损伤指标

通过研究发现,对轻质高强梁结构进行损伤识别时,基于附加质量的频率灵敏度损伤方程能够准确识别损伤程度,但是在对称位置也会有损伤出现,无法判断对称位置是否有损伤发生,从而对损伤检测造成干扰;而模态应变能变化构成的损伤指标能够较准确地

识别损伤位置。如果结合两种方法,充分发挥其优点,既能识别结构损伤位置,又能识别损伤程度,可在进行轻质高强梁结构损伤识别时取得较好的检测效果。具体做法如下所述。

首先,对式(9)进行归一化处理,即

$$\{\bar{\gamma}^*\} = \frac{(\gamma_1^* \ \gamma_2^* \ \dots \ \gamma_N^*)^T}{\max(\gamma_1^* \ \gamma_2^* \ \dots \ \gamma_N^*)^T}; \quad (10)$$

然后,将附加质量频率灵敏度的损伤指标  $\gamma$  与应变能变化的损伤指标  $\bar{\gamma}^*$  按下式进行综合处理

$$\{\beta\} = \{\gamma\} \cdot \{\bar{\gamma}^*\} \quad (11)$$

向量  $\gamma$  与向量  $\bar{\gamma}^*$  为点乘关系,即对应单元基于两种损伤识别方法的损伤指标相乘,从式(11)可以看出,综合后的损伤指标  $\beta$  既能利用附加质量的频率灵敏度法损伤程度识别精度高的优点,又能发挥模态应变能法定位准确度高的特点,可以有效解决轻质高强结构的损伤识别问题。该方法具体实施流程如图 1 所示。

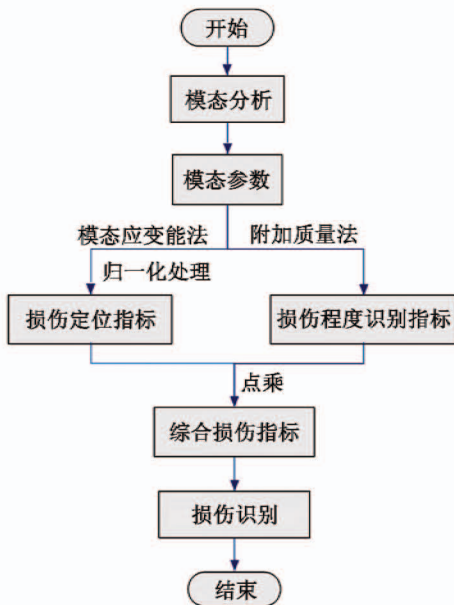


图 1 损伤识别流程图

Fig. 1 Flow chart of damage identification

当结构有多处损伤时,仍然可采用上述综合损伤指标进行损伤识别。在处理时,可将应变能损伤指标划分为若干区域,然后进行分段归一化处理,具体为

$$\begin{cases} \{\bar{\gamma}_1^*\} = \frac{(\gamma_1^* \ \gamma_2^* \ \dots \ \gamma_n^*)^T}{\max(\gamma_1^* \ \gamma_2^* \ \dots \ \gamma_n^*)^T} \\ \{\bar{\gamma}_2^*\} = \frac{(\gamma_{n+1}^* \ \gamma_{n+2}^* \ \dots \ \gamma_m^*)^T}{\max(\gamma_{n+1}^* \ \gamma_{n+2}^* \ \dots \ \gamma_m^*)^T} \\ \vdots \\ \{\bar{\gamma}_p^*\} = \frac{(\gamma_{m+1}^* \ \gamma_{m+2}^* \ \dots \ \gamma_N^*)^T}{\max(\gamma_{m+1}^* \ \gamma_{m+2}^* \ \dots \ \gamma_N^*)^T} \end{cases} \quad (12)$$

则  $\{\bar{\gamma}^*\}$  可表示为

$$\{\bar{\gamma}^*\} = [\bar{\gamma}_1^* \ \bar{\gamma}_2^* \ \dots \ \bar{\gamma}_p^*] \quad (13)$$

结合式(5)和式(13),即得到可识别多处损伤的综合损伤指标  $\beta$ 。

## 2 数值仿真分析

采用大型商用软件 ABAQUS 建立悬臂梁结构,梁长 1000 mm,划分为 20 个单元,单元间隔 50 mm,共有 21 个节点。结构损伤前几何参数和物理参数如下:梁横截面积  $A$  为 0.000 15 m<sup>2</sup>,弹性模量  $E = 105$  GPa,惯性矩  $I = 1.125 \times 10^{-10}$  m<sup>4</sup>,密度  $\rho = 1750$  kg/m<sup>3</sup>。

### 2.1 损伤工况 1

在 16 单元处发生损伤,即距离固定端 800 mm 处,刚度下降 10%,通过模态分析得到低阶固有频率和振型,基于频率灵敏度损伤方程求解各单元损伤参数;并在梁结构的末端 3 个单元节点 18,19,20 处添加质量块,每个节点处的质量块约等于该节点平动自由度对应质量的 6 倍,再次进行模态分析,同样求解附加质量后的频率灵敏度损伤方程,得到各单元损伤参数。附加质量前后梁结构各单元损伤程度参数如图 2 所示。

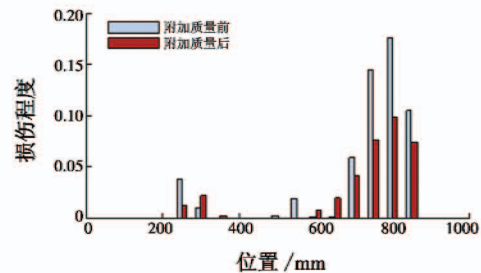


图 2 频率灵敏度损伤检测结果

Fig. 2 Damage detection results of frequency sensitivity method

从图 2 可以看到,基于频率灵敏度法,得到附加质量前后梁结构损伤检测结果,可以看到在 800 mm 处有明显的峰值,可以认定此处发生了损伤,在附加质量之前,得到 800 mm 处的损伤程度为 0.179 1,与设定的损伤程度 0.1 差距较大,误差为 79.1%;附加质量后 800 mm 处损伤程度为 0.098 3,误差为 1.7%,因此,通过添加质量块的方法可以有效地提高损伤位置处损伤识别精度。然而,由于结构质量轻的原因,在 800 mm 对称位置处也会有峰值出现,通过频率灵敏度损伤识别结果无法有效地判断该处是否有损伤发生,对损伤检测定位造成一定干扰。

利用模态应变能变化对梁结构进行损伤检测,损伤指标结果如图 3 所示。

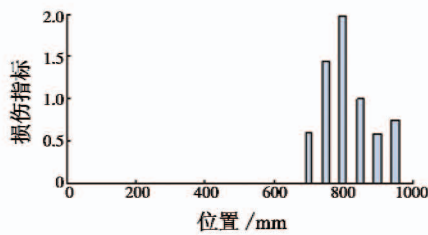


图 3 模态应变能变化损伤检测结果

Fig. 3 Damage detection results of modal strain energy method

从图 3 可以看到,在 800 mm 处有明显的峰值出现,可以认为此处发生了损伤,因此,利用模态应变能可以有效地对损伤位置进行检测定位,但是无法判定损伤程度。

结合两种方法的优点,得到综合后的损伤指标结果,3 种损伤识别方案的识别结果如图 4 所示。

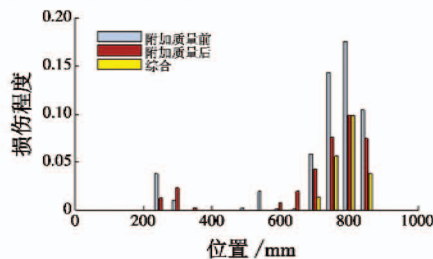


图 4 3 种损伤识别方案的识别结果(工况 1)

Fig. 4 Identification results of three methods(Condition 1)

由图 4 可知,综合后的损伤指标结果可以明显地看到 800 mm 处发生损伤,其损伤程度计算值为 0.098 3,与假设值 0.1 有 1.7% 的误差,并消除了损伤定位干扰因素。因此,综合后的损伤指标可以很好地识别单一损伤。

## 2.2 损伤工况 2

在单元 10 和单元 16 发生损伤,即距离固定端 500 mm 和 800 mm 处,刚度分别下降 30% 和 10%,附加质量同损伤工况 1 相同,得到 3 种损伤识别方案的识别结果,如图 5 所示。

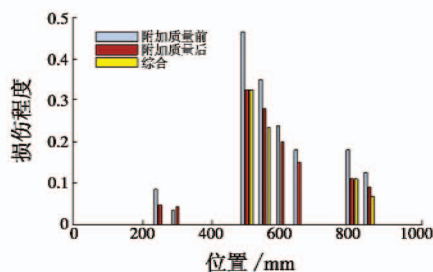


图 5 3 种损伤识别方案的识别结果(工况 2)

Fig. 5 Identification results of three methods(Condition 2)

从图 5 中看到,在 500 mm 和 800 mm 处出现较大峰值,附加质量前,损伤程度分别为 0.462 9 和 0.179 1,与假设值(0.3,0.1)分别有 54.3% 和 79.1% 的误差;

附加质量之后,损伤程度分别为 0.324 9 和 0.108 9,与假设值(0.3,0.1)分别有 8.3% 和 8.91% 的误差。然而在 250 ~ 300 mm 处也会有微弱峰值出现,但是无法确定该位置是否有损伤发生。而应变能变化损伤指标可以准确地定位结构损伤位置,并消除损伤判断干扰因素,损伤定位效果良好,但是无法识别损伤程度。结合两种方法的优点,得到综合后的损伤指标,对于多损伤轻质高强结构而言,既可以实现精确定位,又能识别损伤程度,且误差较小,对工程实际应用具有指导帮助。

## 3 实验检测及分析

通过有限元仿真算例验证了综合后损伤识别指标的优越性,为轻质高强梁结构损伤检测提供了理论基础。接下来,选取碳纤维梁试验件进行损伤检测研究<sup>[19]</sup>。该试件具有质量轻、强度大等特点,试件长 480 mm,宽 50 mm,厚 3 mm,选取 3 个相同规格不同损伤程度的试件,损伤程度分别为完好无损、距离固定端 210 mm 存在圆孔、距离固定端 210 mm 和 310 mm 处分别存在圆孔,试件如图 6 所示。

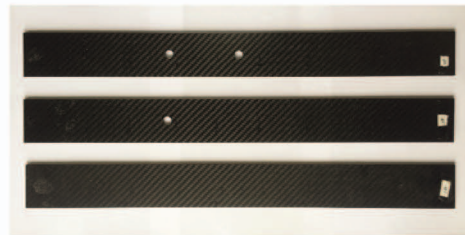


图 6 梁试件

Fig. 6 Beam specimen

### 3.1 算例 1

选取完好试件和距离固定端 310 mm 存在圆孔的试件,在试件上布置加速度传感器进行模态分析,提取损伤前后低阶模态参数;然后在试件的末端添加质量块再次进行模态分析,得到系统附加质量后的模态参数以及附加质量前后梁试件的损伤检测指标结果。同样,利用低阶模态振型,得到基于模态应变能变化的损伤指标。

基于附加质量的频率灵敏度损伤方程可以较好地识别结构损伤程度,而模态应变能变化定位效果良好。综合以上两种方法的优点,得到综合的损伤指标结果,3 种识别方案损伤识别结果如图 7 所示。

通过图 7 可以看出,在大约距离固定端 315 mm 处发生损伤,损伤程度为 0.284 7,其位置正好在小孔位置附近,虽然无法判定损伤误差,但是根据数值仿真可以看到,损伤误差较小,考虑模态分析中 3% 的噪声等干扰因素,损伤识别误差基本在 10% 左右,能够满足实际工程检测要求。

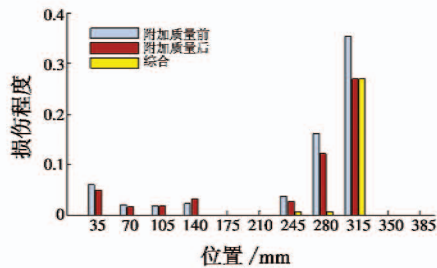


图7 3种损伤识别方案的识别结果(算例1)

Fig.7 Identification results of three methods(Example 1)

### 3.2 算例2

选取完好试件及分别距离固定端 210 mm 和 310 mm 处存在圆孔的试件,同算例 1 相同检测条件下,得到 3 种损伤识别方案的识别结果如图 8 所示。

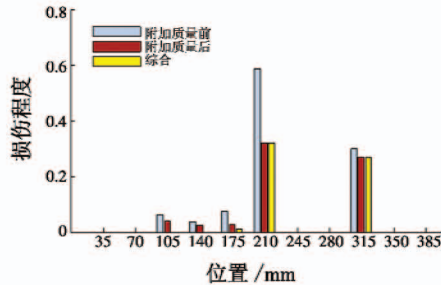


图8 3种损伤识别方案的识别结果(算例2)

Fig.8 Identification results of three methods(Example 2)

从图 8 中的损伤识别结果来看,在 210 mm 和 315 mm 附近均有较大峰值出现,可以认为这两处发生了损伤,检测位置正好与结构圆孔位置吻合,且损伤程度分别为 0.319 2 和 0.270 3,其中,该试件中 315 mm 处的损伤程度同算例 1 中相同位置的损伤程度 0.287 4 相差较小,说明综合后的损伤指标在实际应用中具有良好的识别定位效果。

通过实验研究发现,该方法能够较好地对轻质高强梁结构进行损伤识别定位,在实际工程应用中具有指导意义。

## 4 结论

本文针对轻质高强梁结构,提出了一种基于模态振型和模态应变能相结合的损伤识别方法。该方法将附加质量的频率灵敏度法和模态应变能法相结合,建立包含结构模态振型和应变能等信息的损伤指标。通过数值仿真和实验验证了本文方法的正确性和有效性。结果表明,该方法利用模态应变能定位准确的优点,能够有效克服基于附加质量的频率灵敏度法带来的损伤干扰问题,解决了轻质高强梁结构的损伤识别问题。

### 参考文献

[1] WEST W M. Illustration of the use of modal assurance cri-

terion to detect structural changes in an orbiter test specimen [C]//Proceedings of Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity, 1984:1-6.

- [2] STUBBS N, KIM J T. Damage localization in structures without baseline modal parameters[J]. AIAA Journal, 1996, 34(8):1644-1649.
- [3] LIM T W, KASHANGAKI T A L. Structural damage detection of space truss structures using best achievable eigenvectors[J]. AIAA Journal, 1994, 32(5):1049-1057.
- [4] DOEBLING S W, FARHAT C, HEMEZ F M. Improved damage location accuracy using strain energy-based mode selection criteria [J]. AIAA Journal, 1997, 35(4):693-699.
- [5] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Structural damage detection from modal strain energy change [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12):1216-1223.
- [6] 郭惠勇, 盛懋. 基于模态应变能的不同损伤指标对比 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5):444-450.
- [7] 郭惠勇, 罗乐, 盛懋, 等. 基于岭估计和 L 曲线的损伤识别技术研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(4):200-204.
- [8] KHIEM N T, LIEN T V. A simplified method for natural frequency analysis frequency nanlysis of a multiple cracked beam [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 245(4):737-751.
- [9] MESSINA A, JONES I A, WILLIAMSE J. Damage detection and localization using natural frequency changes [C]//Proceedings of Conference on Identification in Engineering Systems, 1996:67-76.
- [10] 杨秋伟, 刘济科. 结构损伤诊断的改进灵敏度方法 [J]. 固体力学学报, 2012, 33(1):112-118.
- [11] 杨秋伟, 刘济科. 结构损伤识别的附加质量方法 [J]. 工程力学, 2009, 26(5):159-163.
- [12] 周卫东, 杨秋伟, 赵卫. 环境激励下结构损伤识别广义柔度扰动法 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(23):166-169.
- [13] YANG Q W, LIU J K. A coupled method for structural damage identification [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 296:401-405.
- [14] 金卫民, 杨秋伟. 结构损伤检测的一种改进附加质量方法 [J]. 机械强度, 2010, 32(4):542-545.
- [15] 薛松涛, 钱宇音, 陈镭, 等. 采用二阶频率灵敏度的损伤是被和试验 [J]. 同济大学学报, 2003, 31(3):263-266.
- [16] 王志华, 陈建云, 马宏伟. 基于频率敏感度和振型的圆柱壳损伤检测方法研究 [J]. 机械强度, 2007, 29(1):36-43.
- [17] ZHAO J, DEWOLF J T. Sensitivity study for vibrational

(下转第 108 页)

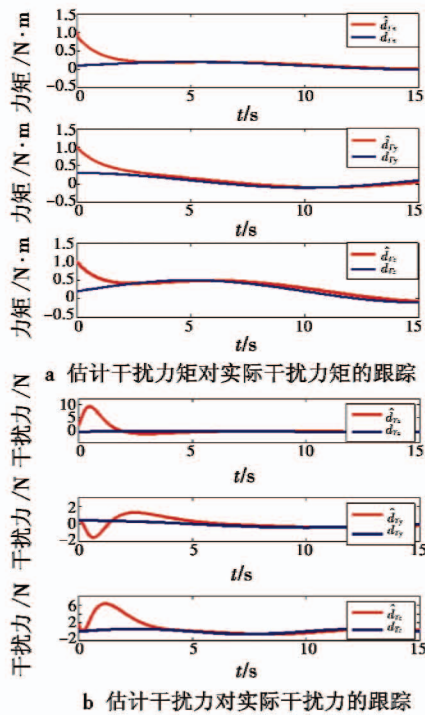


图5 估计干扰对实际干扰跟踪的仿真图

Fig.5 Tracking of estimated disturbance to desired disturbance

## 5 结束语

针对同时存在执行器故障和外界干扰的四旋翼无人机系统,本文提出了自适应容错控制的方法。首先,采用单位四元数描述系统姿态,以避免产生奇异;其次,考虑到无人机位置子系统的欠驱动特性,引入虚拟控制力,解算出实际输入推力和目标姿态;再次,通过自适应容错控制的方法,来补偿由执行器故障和外界干扰带来的影响,以保证无人机仍能稳定地跟踪目标姿态信号;最

后,通过仿真实验证明了该控制方法的有效性。

## 参考文献

- [1] LEE D B, NATARAJ C, BURG T C, et al. Adaptive tracking control of an underactuated aerial vehicle [C]// American Control Conference (ACC), 2011:2326-2331.
- [2] QU Q, GAO S, HUANG D, et al. Fault tolerant control for UAV with finite-time convergence [C]// Chinese Control and Decision Conference, 2014:2857-2862.
- [3] 路飞飞. 四旋翼直升机姿态控制系统的自适应容错控制算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [4] 杨成顺,杨忠,黄宵宁,等. 四旋翼飞行器的分散式容错控制[J]. 应用科学学报,2013, 31(3):321-330.
- [5] 官勋,王丽. 四旋翼飞行器的容错姿态稳定控制[J]. 电光与控制,2014, 21(7):14-18.
- [6] 贺有智,刘同其. 四旋翼飞行器时延积分反演容错控制[J]. 系统工程与电子技术,2015, 37(10):2341-2346.
- [7] 张宇. 四旋翼无人机的容错控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [8] QIAN M S, JIANG B, XU D Z. Fault tolerant tracking control scheme for UAV using dynamic surface control technique[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2012, 31(5):1713-1729.
- [9] RAFFO G V, ORTEGA M G, RUBIO F R. An integral predictive/nonlinear  $H_\infty$  control structure for a quadrotor helicopter[J]. Automatica, 2010, 46(1):29-39.
- [10] ROBERTS A. Attitude estimation and control of a ducted fan VTOL UAV [D]. Thunder Bay: Lakehead University, 2007.
- [11] 刘金珉. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真—基本理论与设计方法[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2015.
- [12] 刘晖,瞿伟廉,袁润章. 基于模态应变能耗散率理论的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击,2004, 23(2):118-121.
- [13] 顾培英. 基于应变模态技术的结构损伤诊断直接指标法研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [14] 袁明,贺国京. 基于模态应变能的结构损伤检测方法研究[J]. 铁道学报,2002, 24(2):92-94.
- [15] 刘晖,瞿伟廉,袁润章. 基于模态应变能耗散率理论的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击,2004, 23(2):118-121.
- [16] 顾培英. 基于应变模态技术的结构损伤诊断直接指标法研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [17] 袁明,贺国京. 基于模态应变能的结构损伤检测方法研究[J]. 铁道学报,2002, 24(2):92-94.
- [18] LAM H F, KO J M, WONG C W. Localization of damaged structural connections based on experimental modal and sensitivity analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 210(1):91-115.
- [19] 陈春鹏,王若鑫,丁国富,等. 飞机结构件加工车间多层次式布局与优化研究[J]. 制造业自动化,2017, 39(2):138-139.
- [20] 吴定会,许世鹏,刘稳. 模具车间 MES 系统的研究与应用[J]. 制造业自动化,2017,39(5):8-9.
- [21] 戴宝纯,张宇孝. “按订单”生产模式下生产计划的编制[J]. 制造业自动化,2000,22(9):7-11.
- [22] 马存义. 关于军工产品批生产质量的控制方法[J]. 内蒙古科技与经济,2011,19:40.
- [23] 高举红,陈思宇,刘晓宇. 基于精益设计的生产能力分析[与现场物流改善[J]. 工业工程,2010,13(1):90-96.

(上接第95页)

parameters used in damage detection [J]. Journal of Structure Engineering, 1999, 125(4):410-416.

- [18] LAM H F, KO J M, WONG C W. Localization of damaged structural connections based on experimental modal and sensitivity analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 210(1):91-115.

(上接第103页)

## 参考文献

- [1] 陈春鹏,王若鑫,丁国富,等. 飞机结构件加工车间多层次式布局与优化研究[J]. 制造业自动化,2017, 39(2):138-139.
- [2] 吴定会,许世鹏,刘稳. 模具车间 MES 系统的研究与应用[J]. 制造业自动化,2017,39(5):8-9.
- [3] 戴宝纯,张宇孝. “按订单”生产模式下生产计划的编制[J]. 制造业自动化,2000,22(9):7-11.
- [4] 马存义. 关于军工产品批生产质量的控制方法[J]. 内蒙古科技与经济,2011,19:40.
- [5] 高举红,陈思宇,刘晓宇. 基于精益设计的生产能力分析[与现场物流改善[J]. 工业工程,2010,13(1):90-96.