

基于 Guyan 缩聚与均布载荷面曲率的柱壳损伤识别*

赵建刚¹, 张玉祥¹, 陈家照¹, 张鑫²

(1. 火箭军工程大学导弹工程学院 西安, 710025)

(2. 哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨, 150090)

摘要 针对工程中采用模态测试对火箭柱壳结构的蒙皮进行损伤识别时,存在高阶模态较难获取和实际结构测点自由度与模型自由度不匹配的问题,提出基于 Guyan 缩聚与均布载荷面曲率的损伤识别方法。通过对柱壳蒙皮有限元模型的 2 次 Guyan 缩聚,将其平动和转动自由度缩聚到法向上,并以法向的模态振型作为输入参数,构建基于均布载荷面曲率的损伤指标,数值分析了该指标对火箭柱壳蒙皮的损伤识别效果。结果表明:缩聚后的模型能够完全满足工程需求;所提方法只需低阶模态参数,不但可以识别出柱壳结构单损伤和多损伤位置,而且能够给出损伤程度的相对大小。该方法对工程实际中火箭蒙皮的损伤识别具有重要的参考价值。

关键词 损伤识别;模态测试;Guyan 缩聚;均布载荷面曲率;火箭柱壳蒙皮

中图分类号 TH703;V415

引言

大型液体火箭外体主要由蒙皮、隔框及桁条等组成,以柱壳结构蒙皮为基础,用点焊或铆接的方法将其与桁条、隔框连在一起,共同起到承载外部载荷的作用^[1]。在实际使用过程中,柱壳结构的蒙皮不仅受到火箭整体重力作用的影响,而且随时受到外部环境的腐蚀、冲击等载荷作用,极易发生损伤破坏。近年来,基于结构动力特性构造损伤识别指标,研究柱壳结构损伤识别的问题得到了越来越多学者的关注。Martineau 等^[2]根据柱壳结构的受力载荷,从结构动力学出发,研究了柱壳结构体系的动力特性。Chen 等^[3-4]研究了海上导管架平台支腿柱壳结构的损伤识别,通过构造模态柔度曲率矩阵损伤指标识别出了损伤位置,并利用单元的等效曲率比和损伤程度的关系曲线判断出损伤程度大小。许金余等^[5]采用固有频率和模态振型构造的同阶特征对比值变化量和应变模态差对柱壳结构的损伤情况进行诊断,数值仿真了水泥柱壳结构的损伤识别,得到很好的效果。张效忠等^[6]从结构振动方程出发,应用敏感单元模态应变能方法对某柱壳结构的新型防浪堤进行单处损伤和多处损伤的损伤识别,研究结果表明该方法具有较高的精度和较好的鲁棒性。

上述基于结构动力特性的损伤识别方法,在应用时常会遇到有限元模型与实际结构测点自由度不匹配的问题。特别是对比较复杂的结构,比如大型液体火箭,传感器往往只能布置在少数有限的位置上,

仅能测得对应位置处的响应^[7]。在工程计算中,为获得满足工程精度要求的低阶有效计算模型,一般都使用模型缩聚技术。Guyan 缩聚是一种常用的模型缩聚方法,可以很好地解决模型与实际结构自由度不匹配的问题。张弛^[8]将 Guyan 缩聚法用在薄板结构有限元模型上,分析结果对有限元模型进行缩聚动力学修改具有一定的指导意义。潘晓威等^[9]利用改进的 Guyan 缩聚法对平面桁架结构进行水平自由度缩减,解决了实测自由度与理论自由度不匹配的问题。戴冠帮^[10]对大型结构模型缩聚技术进行改进与完善,解决了传统优化算法对大型结构测点的优化配置失效问题。方有亮等^[11]采用 Guyan 缩聚法对 3 层平面钢架子结构缩聚掉内部自由度,仅保留测点的自由度信息,并运用模型缩聚-频响函数型模型修正方法识别子结构的损伤。参考以上研究,笔者提出采用 Guyan 缩聚方法解决实际中大型液体火箭测点自由度与有限元模型自由度不匹配的问题,并将该方法用在火箭柱壳蒙皮的损伤识别研究中。

基于结构动力特性的损伤识别方法要得到较高的识别精度大多要求获得结构高阶模态参数,这对于实际中大型液体火箭来说比较困难。均布载荷面曲率法是一种基于结构动力学的模态参数损伤识别方法,该方法是在模态柔度法基础上提出的,一般在获得低阶模态参数的情况下就可识别损伤。Wu 等^[12]基于切比雪夫多项式拟合的均布载荷面曲率法用于 2 维板结构的损伤识别,研究了不同噪声水平、

* 国家自然科学基金资助项目(51975581)

收稿日期:2020-06-10;修回日期:2020-09-22

边界条件对损伤识别效果的影响。Sung等^[13]针对均布载荷面法不能精确识别多损伤的问题,提出了归一化的均布载荷面曲率法用于简支梁结构损伤识别,结果表明该指标可以识别单损伤和多损伤。Jung等^[14]通过试验的手段分别对比分析了均布载荷面指标、均布载荷面曲率指标和归一化的均布载荷面曲率指标对简支梁结构的损伤识别效果,结果表明归一化的均布载荷面曲率指标对损伤识别效果明显优于其他2种。唐盛华等^[15-16]推导了梁结构在均布载荷作用下的挠度曲率公式,运用结构损伤前后的挠度曲率差定位损伤,分析了该指标的抗噪能力和实际应用的可行性,并基于线性插值建立简支梁上裂纹位置和相邻测点均布载荷面曲率差的关系,实现了对裂纹位置的精确定位。

笔者以柱壳结构的火箭蒙皮为研究对象,根据有限元分析和柱壳结构特点,首先,采用Guyan缩聚的方法,将柱壳结构上每个节点6个自由度方向缩聚到2个主自由度方向上,再通过坐标变换和2次缩聚,将2个主自由度缩聚到法向自由度,并以法向的模态振型作为输入参数;其次,构建基于均布载荷面曲率法的损伤识别指标,用于火箭柱壳蒙皮的损伤识别;最后,进行数值分析,结果表明该方法不仅可以很好地识别出柱壳结构单损伤和多损伤的位置,而且能够给出损伤程度的相对大小,对火箭蒙皮的损伤识别更具有实际应用价值。

1 理论基础

1.1 有限元模型Guyan缩聚

实际工程中,一般测得的振型都是不完整的,对于柱壳结构,通常测得较多的也是其法向振型数据。为满足工程精度要求,需要对结构模型进行自由度缩聚,以使得结构有限元模型的自由度数与实际测得的自由度数相一致。Guyan缩聚法是有限元分析中广泛使用的自由度减缩方法^[17-18]。针对柱壳结构模型,Guyan缩聚的基本思想是将柱壳节点的法向自由度作为主自由度,其他所有自由度作为副自由度,忽略副自由度惯性力对结构的作用,将结构的副自由度缩聚掉,只保留主自由度。

假设火箭蒙皮柱壳结构为 n 自由度的模型,其结构刚度矩阵和质量矩阵分别为 K 和 M ,则其特征方程为

$$K\Phi_i = \lambda_i M\Phi_i \quad (1)$$

其中: $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为特征对。

式(1)中的振型 Φ_i 可以表示为

$$\Phi_i = \begin{Bmatrix} \phi_i^m \\ \phi_i^s \end{Bmatrix} \quad (2)$$

其中: i 为模态阶数; ϕ_i^m 为主自由度的振型列向量; ϕ_i^s 为副自由度的振型列向量(缩聚部分)。

将结构的刚度矩阵和质量矩阵划分到主、副自由度上,得到结构的振动特征方程为

$$\begin{pmatrix} K_{mm} & K_{ms} \\ K_{sm} & K_{ss} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_i^m \\ \phi_i^s \end{Bmatrix} = \lambda_i \begin{pmatrix} M_{mm} & M_{ms} \\ M_{sm} & M_{ss} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_i^m \\ \phi_i^s \end{Bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可得

$$\phi_i^m = -(K_{mm} - \lambda_i M_{mm})^{-1} (K_{ms} - \lambda_i M_{ms}) \phi_i^s \quad (4)$$

$$\phi_i^s = -(K_{ss} - \lambda_i M_{ss})^{-1} (K_{sm} - \lambda_i M_{sm}) \phi_i^m \quad (5)$$

式(4)和式(5)忽略惯性力的影响,得到

$$\phi_i^m = -K_{mm}^{-1} K_{ms} \phi_i^s \quad (6)$$

$$\phi_i^s = -K_{ss}^{-1} K_{sm} \phi_i^m \quad (7)$$

由式(6)可知主自由度振型与副自由度振型的关系,并可将副自由度振型等效到主自由度上。联合式(2)及式(7)可得Guyan缩聚公式为

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} I \\ -K_{ss}^{-1} K_{sm} \end{bmatrix} \phi_i^m \quad (8)$$

其缩聚转换矩阵 T 为

$$T = \begin{bmatrix} I \\ -K_{ss}^{-1} K_{sm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入到式(1),得出 $KT\Phi_i^m = \lambda_i MT\Phi_i^m$,进而得到缩聚后的特征方程为

$$K_g \phi_i^m = \lambda_i M_g \phi_i^m \quad (10)$$

其中: $K_g = T^T K T$ 为缩聚后的刚度矩阵; $M_g = T^T M T$ 为缩聚后的质量矩阵。

经过1次缩聚后,柱壳结构的自由度只有 x 方向和 y 方向。将平面 xy 坐标转换到极坐标下,即将 x 和 y 方向的自由度转换到柱壳节点的法向和切向方向,再通过2次缩聚,将自由度缩聚到柱壳结构节点的法向。

1.2 均布载荷面

根据无外力作用下缩聚后结构振动的特征方程(10),得到质量归一化振型后的柔度矩阵为

$$F_m = \sum_{i=1}^r [f_{k,l}]_i = \sum_{i=1}^r \frac{1}{\omega_{mi}^2} \phi_i^m \phi_i^{mT} \quad (11)$$

其中: $f_{k,l}$ 为第 r 阶模态时结构中 l 点受到单位载荷作用下,致使结构中的 k 点产生的 r 阶模态下的挠度。

$f_{k,l}$ 的计算公式为

$$[f_{k,l}]_r = \varphi_r^m(k) \varphi_r^m(l) / \omega_{mr}^2 \quad (12)$$

其中: $\varphi_r^m(l)$ 为 l 点作用单位载荷时产生的位移; $\varphi_r^m(k)$ 为单位载荷作用在 k 点产生的位移。

根据线性系统,第 r 阶模态下结构上所有节点同时受到单位载荷作用时,在 k 点产生的挠度可近似表示为

$$[u(k)]_r = \sum_{l=1}^N [f_{k,l}]_r = \varphi_r^m(k) \sum_{l=1}^N \varphi_r^m(l) / \omega_{mr}^2 \quad (13)$$

定义均布载荷面^[12]为结构在单位载荷作用下所产生的整体挠度向量,即

$$U = \sum_{r=1}^M \left\{ [u(k)]_r \right\} = \sum_{i=1}^r \left\{ \varphi_i^m(k) \sum_{l=1}^n \varphi_i^m(l) / \omega_{mi}^2 \right\} = F_m L \quad (14)$$

其中: $L = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times n}^T$ 为均布载荷面在结构上的单位向量。

1.3 损伤识别指标

结构发生损伤时,其模态参数会发生较大的变化,尤其在损伤位置处容易发生局部模态。均布载荷面是由模态参数构成的函数,若结构出现损伤,则损伤前后均布载荷面必然会发生变化。为了更加敏感地反映均布载荷面的变化,笔者使用柱壳结构节点处的均布载荷面曲率来构造损伤指标。根据柱壳结构的特点,采用中心差分法,分别计算柱壳结构轴向与周向两方向上的曲率。

在轴向,柱壳节点的均布载荷面曲率为

$$u_{ac}(a_i, c_j) = \frac{u(a_{i+1}, c_j) - 2u(a_i, c_j) + u(a_{i-1}, c_j)}{\Delta a^2} \quad (15)$$

其中: u_{ac} 为轴向均布载荷面曲率; $u(a_i, c_j)$ 为节点 (i, j) 在坐标 (a_i, c_j) 位置处的均布载荷面值; Δa 为轴向节点间距。

在周向,可以将柱壳结构看成是由 1 组圆环结构的组合。根据圆的曲率公式 $C = \frac{|y''|}{[1 + (y')^2]^{\frac{3}{2}}}$, 得

到柱壳节点的均布载荷面曲率为

$$u_{cc}(a_i, c_j) = \left(\frac{u(a_i, c_{j+1}) - 2u(a_i, c_j) + u(a_i, c_{j-1}))}{\Delta c^2} \right) \times \left(1 + \left(\frac{u(a_i, c_{j-1}) - u(a_i, c_j)}{\Delta c} \right)^2 \right)^{\left(-\frac{3}{2}\right)} \quad (16)$$

其中: u_{cc} 为周向均布载荷面曲率; Δc 为周向节点间距。

分别测得结构在完好状态和损伤状态下的模态参数,通过式(15)和式(16)计算得到损伤和完好状态下柱壳结构各节点处的均布载荷面曲率,进一步构造损伤识别指标为

$$d(a_i, c_j) = \left[\alpha_a \left| u_{ac}^D(a_i, c_j) - u_{ac}(a_i, c_j) \right| + \alpha_c \left| u_{cc}^D(a_i, c_j) - u_{cc}(a_i, c_j) \right| \right]^2 \quad (17)$$

其中: u_{ac}, u_{cc} 分别为完好结构沿柱壳轴向和周向的曲率; u_{ac}^D, u_{cc}^D 分别为损伤结构沿柱壳轴向和周向的曲率; α_a, α_c 分别为沿柱壳轴向和周向的曲率权重,其大小均在 0~1 之间。

2 火箭蒙皮有限元分析

2.1 有限元建模

大型液体火箭的外体一般是以柱壳结构的铝合金蒙皮为基础,通过将隔框和桁条铆接或是点焊在柱壳蒙皮上,共同起到承力和保护内部仪器的作用,某型液体火箭外体见图 1。根据某型液体火箭的柱壳蒙皮结构,建立如图 2 所示的有限元模型。模型直径为 1 m, 高为 2 m, 厚度为 1.2 mm, 共有 620 个单元, 651 个节点, 网格单元大小为 0.1 m × 0.101 3 m, 边界条件为上下两环形端底固定约束。火箭蒙皮的材料参数为: 密度 $\rho = 2\ 875\ \text{kg/m}^3$; 弹性模量 $E = 7.0 \times 10^{10}\ \text{Pa}$; 泊松比 $\gamma = 0.34$ 。

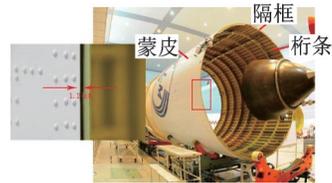


图 1 某型液体火箭外体(蒙皮)
Fig.1 A liquid rocket outside (skin)

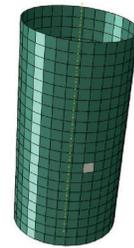


图 2 火箭蒙皮有限元模型
Fig.2 The finite element model of the rocket skin

在有限元处理中,相对应图中的节点编号用矩阵 A_1 表示,相对应图中的单元编号用矩阵 A_2 表示

$$A_1 = \begin{bmatrix} 631 & 632 & \dots & 651 \\ 610 & 611 & \dots & 630 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 22 & 23 & \dots & 42 \\ 1 & 2 & \dots & 21 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 601 & 602 & \dots & 620 \\ 591 & 592 & \dots & 600 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 21 & 22 & \dots & 40 \\ 1 & 2 & \dots & 20 \end{bmatrix}$$

在均布载荷面曲率矩阵和损伤识别指标矩阵的处理中,按照以下的矩阵进行编排(这里给出轴向,周向同理)

$$\begin{bmatrix} 1_{21} & 2_{21} & \cdots & 31_{21} \\ 1_{20} & 2_{20} & \cdots & 31_{20} \\ \vdots & \vdots & a_i & \vdots \\ 1_2 & 2_2 & \cdots & 31_2 \\ 1_1 & 2_1 & \cdots & 31_1 \end{bmatrix}$$

其中: a_i 中的 a 为列数,下标 i 为每列的节点数。

相对应有限元的损伤节点编号为 241,242,262 和 263,单元编号为 230。对应的损伤指标编号为第 12 列的 10,11 和 13 列的 10,11 节点。

2.2 结构动力分析

当火箭蒙皮出现损伤时,其结构刚度就会减小。有限元模型中,一般以单元弹性模量的降低来模拟结构损伤。为验证本研究中所提损伤识别指标的敏感性和有效性,设置了火箭蒙皮主要损伤工况,如表 1 所示。

表 1 火箭蒙皮损伤工况

Tab.1 The rocket skin damage case

损伤工况	损伤单元	损伤程度/%
完好	无	0
1	E230	10
2	E230	30
3	E230	50
4	E455	50
5	E230,E455	10,30
6	E230,E455	50,50

在有限元分析软件 ABAQUS 中,对火箭蒙皮模型进行模态分析,获得结构前 4 阶的频率和质量归一化模态振型。各工况下火箭蒙皮的固有频率如表 2 所示。

表 2 各工况下火箭蒙皮的固有频率

Tab.2 The natural frequency of the rocket skin under each case Hz

阶数	完好	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
1	76.493	76.471	76.417	76.341	76.455	76.456	76.317
2	76.494	76.493	76.493	76.493	76.482	76.483	76.469
3	85.347	85.316	85.237	85.125	85.282	85.281	85.341
4	85.347	85.347	85.347	85.347	85.342	85.345	85.555

通过有限元计算容易得到上述火箭蒙皮结构的模态振型,并且能够得到所有需要自由度上的振型。但在实际工程中,由于大型液体火箭结构复杂,质量、体积及刚度等参数量级庞大,传统的锤击或激励器激励等方法存在诸多不足^[19],因此无法获取实

际结构所有自由度上的振型,也较难得到对质量归一化的振型。针对上述问题,笔者提出将火箭柱壳蒙皮的有限元模型进行 Guyan 缩聚,使有限元模型的自由度与实际结构测得的自由度相匹配。另外,利用文献[20]关于振型归一化方法对柔度曲率类损伤指标影响的结论,实际工程中用 2-范数归一化振型代替质量归一化振型。

2.3 模型缩聚

通过对火箭柱壳结构蒙皮的动力学分析,获得模态振型及频率等参数。图 3 和图 4 分别为柱壳结构完好和损伤状态(单元 230 损伤 50%)时的 1 阶模态振型图,其他阶模态振型图不再给出。由图 3 和图 4 可以看出,柱壳结构的振型主要在其法向方向。

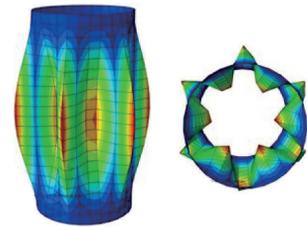


图 3 完好结构 1 阶模态振型图

Fig.3 The first order mode shape diagram of intact structure

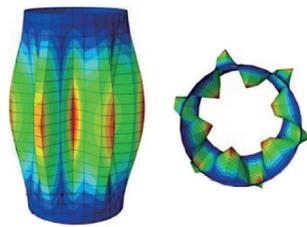


图 4 损伤结构 1 阶模态振型图

Fig.4 The first order mode shape diagram of damage structure

在实际工程中,一般容易得到柱壳结构法向自由度的振型。为贴近工程中实际模型的计算,提高运算效率,对 2.2 节得到的柱壳蒙皮每个节点 6 个自由度方向的振型经过式(3)~(10)数值计算,将其均缩聚到法向。经过 2 次缩聚后,结构的整体刚度矩阵、整体质量矩阵均仅包含 651 个自由度。柱壳蒙皮模型缩聚前后的频率如表 3 所示。通过比较发

表 3 柱壳蒙皮模型缩聚前后的频率

Tab.3 The frequency of the shell skin before and after polycondensation Hz

阶数	缩聚前	缩聚后
1	76.493	76.325
2	76.494	76.325
3	85.347	85.443
4	85.347	85.443

现,缩聚前后的频率基本没有差别,故缩聚后的模态参数完全满足工程需要。

3 火箭蒙皮损伤识别

将缩聚后的模型参数代入式(14)~(16),使用 Matlab 数值分析,得到各工况下的均布载荷面曲率矩阵,再由式(17)计算得到火箭蒙皮损伤前后有限元模型上各节点位置处的均布载荷面曲率值,进而得到损伤指标矩阵。

3.1 单损伤识别

通过设置单元弹性模量的降低来模拟单元损伤,对工况 1~工况 4 下火箭柱壳蒙皮的损伤识别效果如图 5 所示。其中: z 轴为柱壳高度; x 轴和 y 轴分别为损伤指标在 x 和 y 方向的分量。由式(17)可知,损伤指标是曲率变化率的差值,所以 x 轴和 y 轴无量纲,后面损伤识别效果图中单位与图 5 一致。图 5 中:工况 1~工况 3 分别为单元 230 损伤 10%、30% 和 50% 的识别效果,可以看出在柱壳模型的周向第 10,11 行和轴向第 12,13 列处节点的损伤指标值较大,凸出明显;工况 4 为单元 455 损伤 50% 的识别效果,可以看出在柱壳模型的周向第 15,16 行和轴向第 23,24 列处节点的损伤指标值较大,凸出明显。因此,对于柱壳结构的单损伤,此损伤指标都可以有效识别,并且可以识别出不同位置的损伤。

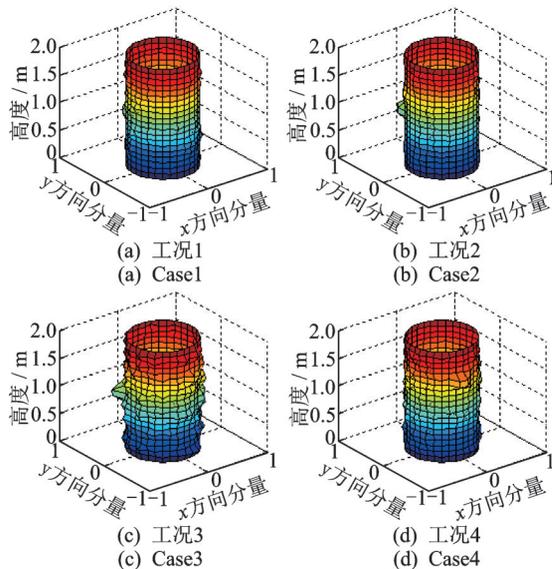


图 5 工况 1~工况 4 下火箭柱壳蒙皮损伤识别效果

Fig.5 The effect of damage identification of the rocket shell skin under case 1~case 4

图 6 为在工况 1~工况 3 情况下,柱壳蒙皮识别效果的周向第 10 行截面曲线。其中:黑线代表单元 230 损伤 10% 时的损伤指标曲线;红线代表单元

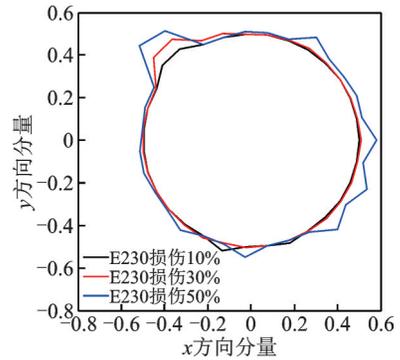


图 6 工况 1~工况 3 下柱壳周向第 10 行曲线

Fig.6 The 10th line circumferential curve of the cylindrical shell under case 1~case 3

230 损伤 30% 时的损伤指标曲线;蓝线代表单元 230 损伤 50% 时的损伤指标曲线。由图可知,同一单元在不同损伤程度下,随着损伤程度的增大,损伤单元的节点凸出逐步增大。结果表明,该损伤指标可以反映出损伤程度的相对大小。图 7 为工况 4 下,柱壳识别效果模型周向第 14~17 行的截面曲线。其中:红线代表的第 15 行损伤指标曲线和黑线代表的第 16 行损伤指标曲线在轴向第 23,24 列有明显凸起;而其周边相邻的蓝线代表第 14 行损伤指标曲线和绿线代表第 17 行损伤指标曲线均未有明显凸起,结合图 5 中工况 4 的柱壳损伤模型,进一步确定损伤发生在第 455 单元。对于单损伤,笔者提出的指标既可以识别出火箭柱壳蒙皮的损伤位置,而且还可以相对给出损伤程度的大小。

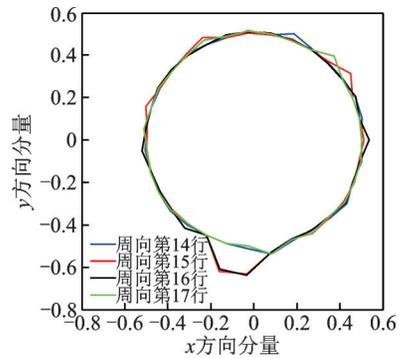


图 7 工况 4 下柱壳周向第 14~17 行曲线

Fig.7 The 14th~17th line circumferential curves of the cylindrical shell under case 4

3.2 多损伤识别

对于多损伤,文中分别以单元 230 损伤 10% 与单元 455 损伤 30%,和单元 230 与单元 455 同时损伤 50% 来进行模拟,并使用提出的方法进行损伤识别,工况 5、工况 6 下火箭柱壳蒙皮的损伤识别图分

别如图 8 和图 9 所示。

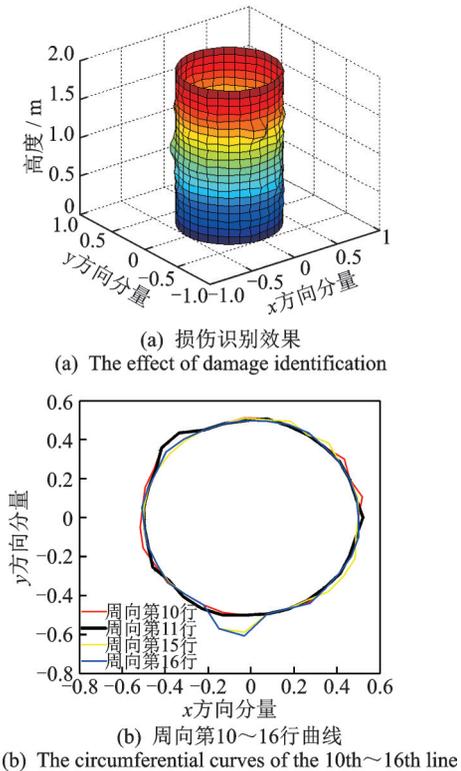


图8 工况5下火箭柱壳蒙皮损伤识别图
Fig.8 Damage identification diagram of rocket shell skin under case 5

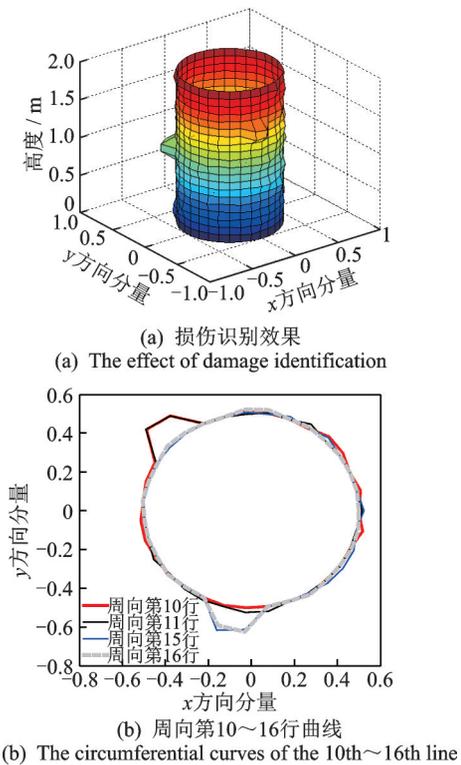


图9 工况6下火箭柱壳蒙皮损伤识别图
Fig.9 Damage identification diagram of rocket shell skin under case 6

由图 8 可以看出:图(a)中明显存在 2 个凸起部位,可以初步判断出损伤位置;图(b)为图(a)识别效果中的截面曲线,其中红色、黑色、黄色和蓝色实线分别代表周向第 10,11,15 和 16 行损伤指标曲线,结合图(a)可以确定损伤发生在单元 230 和单元 455,并且单元 230 的损伤程度比单元 455 的损伤程度要小。同理,可以得出图 9 的损伤识别结论。进一步得出,笔者提出的损伤指标能够识别出火箭柱壳蒙皮的多处损伤,并且能够给出损伤程度的相对大小。

4 结 论

1) 采用 2 次 Guyan 缩聚法将柱壳蒙皮模型的转角和平动自由度缩聚到法向,缩聚后的模型与原模型的模态参数基本没有差别,满足精度要求,能够用于工程中火箭柱壳蒙皮的损伤识别。

2) 提出了基于均布载荷面曲率的损伤指标,数值分析表明,该指标只需前 4 阶模态参数就可以有效识别出单位置损伤和多位置损伤,并且能给出损伤程度的相对大小。

3) 相对于文献[3-4]中使用原始模态参数对柱壳结构损伤识别需要分别计算转角和位移的损伤指标,并要分别考虑轴向和周向的损伤值,本研究采用了缩聚之后的模态参数作为输入,提出综合考虑轴向和周向损伤数值的识别指标,不仅减少了计算量,而且提高了运算效率和损伤识别的精度。

4) 本研究是从大型火箭蒙皮整体结构上对其进行损伤识别,损伤程度的识别只是得到相对大小,没有具体得出损伤数值。另外,对于结构的损伤类型(如裂纹、焊缝开裂、腐蚀脱落及螺栓松动等)没有给出准确的分类,在后续的研究中需要结合其他方法,如压电阻抗法进行更精准、更具体的损伤识别。

5) 本研究只是从数值上对某型液体火箭蒙皮的损伤识别进行了分析,下一步在条件允许的情况下将使用所提方法对火箭蒙皮的实际结构进行损伤识别,以进一步验证方法的准确性。该方法对工程实际中火箭柱壳结构蒙皮的损伤识别具有重要的指导意义。

参 考 文 献

[1] 赵少奎. 导弹与航天技术导论[M]. 北京:中国宇航出版社,2008:95-96.

[2] MARTINEAU R L, ANDERSON C A. Expansion of cylinder shells subjected to internal explosive detonations [J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(2): 219-225.

[3] CHEN L, MA J, ZHAO D Y. Damage identification in legs of jacket platforms based on curvature of flexibility matrix[C]//Proceeding of the Second International

- Forum an Advances in Structural Engineering. Dalian: Dalian University of Technology, 2008:801-809.
- [4] CHEN L, MA J, ZHAO D Y, et al. Curvature of flexibility matrix for damage identification in legs of jacket platforms [J]. China Ocean Engineering, 2008, 22(4):547-559.
- [5] 许金余,张其顶,李海川.柱壳结构体系的损伤判断[J].振动、测试与诊断,2008,28(1):1-4.
XU Jinyu, ZHANG Qiding, Li Haichuan. Damage diagnosis of the cylindrical shell structure system [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(1):1-4. (in Chinese)
- [6] 张效忠,姚文娟.基于敏感模态单元应变能法结构损伤识别[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(7):3014-3023.
ZHANG Xiaozhong, YAO Wenjuan. Structural damage identification using element strain energy method based on sensitive modals [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7):3014-3023. (in Chinese)
- [7] 钟军军.模型缩聚在结构损伤识别中的应用研究[C]//第六届全国土木工程研究生学术论坛.北京:清华大学,2008.
- [8] 张弛.基于Guyan法的有限元模型缩聚技术研究[J].装备制造技术,2013(1):153-154.
ZHANG Chi. Finite elements reduction based on Guyan method [J]. Equipment Manufacturing Technolog, 2013(1):153-154. (in Chinese)
- [9] 潘晓威,方有亮,毛卓能.模型缩聚法在桁架结构损伤识别中的应用[J].四川建筑,2014,34(6):166-168.
PAN Xiaowei, FANG Youliang, MAO Zhuoneng. Application of model condensation method in damage identification of truss structures [J]. Sichuan Architecture, 2014, 34(6):166-168. (in Chinese)
- [10] 戴冠帮.结构模态测试中测点的优化研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
- [11] 方有亮,娄佳琪,张颖,等.基于模型缩聚-频响函数型模型修正的子结构损伤识别方法[J].科学技术与工程,2020,20(18):7356-7362.
FANG Youliang, LOU Jiaqi, ZHANG Ying, et al. Substructure damage identification method based on model condensation-model updating of frequency response function [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(18):7356-7362. (in Chinese)
- [12] WU D, LAW S S. Damage localization in plate structures from uniform load surface curvature [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 276:227-244.
- [13] SUNG S H, JUNG H J, JUNG H Y. Damage detection for beam-like structures using the normalized curvature of a uniform load surface [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332:1501-1519.
- [14] JUNG H Y, JUNG H J. Experiment validation of normalized uniform load surface curvature method for damage localization [J]. Sensors, 2015, 15:26315-26330.
- [15] 唐盛华,楚加庆,方志,等.基于均布载荷挠度曲率的梁结构损伤识别方法[J].力学季刊,2019,40(3):549-559.
TANG Shenghua, CHU Jiaqing, FANG Zhi, et al. Damage identification method of beam structure based on uniform load deflection curvature [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2019, 40(3):549-559. (in Chinese)
- [16] 唐盛华,苏彬建,方志,等.基于均匀载荷面曲率的简支裂纹梁损伤识别[J].计算力学学报,2019,36(6):792-799.
TANG Shenghua, SU Binjian, FANG Zhi, et al. Damage identification of cracked simply supported beam based on uniform load surface curvature [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(6):792-799. (in Chinese)
- [17] 罗虹,李军,曹友强,等.有限元模型动力缩聚中主副自由度选取方法[J].机械设计,2010,27(12):11-14.
LUO Hong, LI Jun, CAO Youqiang, et al. Methods for selecting the master and slave degrees of freedom in dynamic condensation technique of finite element models [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(12):11-14. (in Chinese)
- [18] 景天雨.基于附加虚拟质量的储罐损伤识别方法[D].大连:大连理工大学,2017.
- [19] 闫松,李斌,李斌潮,等.三维扫描测振技术在液体火箭发动机模态试验中的应用[J].宇航学报,2017,38(1):97-103.
YAN Song, LI Bin, LI Binchao, et al. Application of 3-D scanning vibrometry technique in liquid rocket engine modal test [J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(1):97-103. (in Chinese)
- [20] 唐盛华,罗承芳,方志,等.振型归一化对梁结构柔度曲率损伤指标的影响[J].计算力学学报,2020,37(3):340-348.
TANG Shenghua, LUO Chengfang, FANG Zhi, et al. Influence of mode shape normalization on flexibility curvature damage index of beam structure [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2020, 37(3):340-348. (in Chinese)



第一作者简介:赵建刚,男,1984年10月生,博士生。主要研究方向为飞行器结构物理与可靠性。曾发表《基于单元模态应变能的LRM机架损伤识别》(《火箭军工程大学学报》(自然科学版)2019年第33卷第1期)等论文。

E-mail: zhaojgbx001@163.com