大型复杂结构损伤识别两步法研究

李世龙　王天辉　马立元　李永军
军械工程学院，石家庄，050003

摘要：基于模型修正技术及模态柔度曲率差方法提出了一种解决大型复杂结构损伤识别问题的两步法。首先运用基于模型修正的损伤识别方法进行模糊识别，通过建立带约束边界非线性最小二乘目标函数，极小化结构实测模态与解析模态之间的误差，将损伤识别问题转化为优化问题，并采用信赖域方法求解该优化问题，识别出损伤所属单元组。然后运用模态柔度曲率差方法，对损伤进行精确定位。对某导弹发射台骨架的数值仿真及试验研究结果表明，该损伤识别两步法识别效果较为理想，为解决大型复杂结构的损伤识别问题提供了新思路。

关键词：发射台骨架；模型修正；信赖域；模态柔度曲率差；损伤识别
中图分类号：TU311　　DOI：10.3969/j.issn.1004－132X.2012.09.010

Study on Two－step Damage Detection Methods of Large and Complex Structures

Li Shilong　Wang Tianhui　Ma Liyuan　Li Yongjun
Ordnance Engineering College，Shijiazhuang，050003

Abstract：A new method for complex structures damage detection was proposed based on model updating and modal flexibility curvature difference techniques herein. The method have two steps. First，the method based on model updating was used for preparatory detection. The detection problem was transformed into an optimization problem in this method. An objective function was defined as an nonlinear least－squares problem with bound－constrains and for detection of the location of structural damage by minimizing the sum of differences between the experimental and analytical modal data. The trust－region approach was then used to solve the minimization problem. The method based on modal flexibility curvature difference was then used for detect the location of structural damage accurately. Finally，the proposed method was applied for damage detection on the frame of a launch platform. The simulation and experimentatal results show that the proposed method is suitable well for damage detection on such complex structures.

Key words：frame of launch platform；model updating；trust region；modal flexibility curvature difference；damage detection

0　引言

近几十年来，国内外学者在基于振动的结构损伤识别领域开展了大量卓有成效的研究工作，并已经研究得出很多结构损伤识别方法。常用的方法主要包括基于模态频率和振型的方法[1]、基于柔度曲率的方法[2]、基于应变模态的方法[3]、基于模态应变能的方法[4]、基于结构有限元模型修正的方法[5]，以及基于人工神经网络的智能识别方法[6]等。然而，由于结构损伤识别受到如测量噪声、建模误差、传感器布置数目有限等诸多因素的综合影响，目前尚不存在一种对各种结构都适用且有效的识别方法，各种方法都有其适用范围和局限性，并且大都只适用于一些简单的结构。

目前，对于导弹发射台骨架这种大型复杂结构，仍很少有较为成功的损伤识别方法。本文研究了利用结构的动力测试数据进行发射台骨架损伤识别的方法，通过将基于模型修正的损伤识别方法与模态柔度曲率差方法相结合，提出一种能较好解决这种大型复杂结构损伤识别问题的两步法：第一步，运用基于模型修正的损伤识别方法对损伤进行模糊识别，识别出损伤属于结构的哪个单元组；第二步，运用模态柔度曲率差方法，对损伤进行精确定位。仿真算例及试验验证结果表明，本文提出的损伤识别两步法识别效果较为理想，为解决大型复杂结构的损伤识别问题提供了新思路。

1　基于模型修正的结构损伤识别

笔者基于模型修正技术提出了一种新的结构损伤识别方法，该方法通过建立带边界约束的非线性最小二乘目标函数，将损伤识别问题转化为优化问题，然后采用具有全局快速收敛特性的信赖域方法[7-8]对该优化问题进行求解，从而可以快速准确地识别出结构有限元模型（FEM）各单元

收稿日期：2011－05－19

组的刚度降低系数，即实现对结构的损伤识别。

1.1 方法的理论基础

结构损伤会导致结构刚度降低，于是结构整体刚度矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{K}_0-\sum_{i=1}^{N_e}\boldsymbol{\theta}_i\boldsymbol{K}^{(i)} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{K}_0$、$\boldsymbol{K}$ 为结构损伤前后的整体刚度矩阵；$\boldsymbol{K}^{(i)}$ 为结构有限元模型中第 i 单元的单元扩阶矩阵；$\boldsymbol{\theta}_i$ 为 N_e 维单元刚度降低系数（stiffness reduction coefficients，SRC）向量；N_e 为有限元模型中的单元总数。

SRC 在本文中代表各单元弹性模量的降低量，用来表征损伤程度的大小。

1.1.1 目标函数的建立

为了极小化有限元模型的计算模态与结构实测模态的差别，目标函数被定义为一个带边界约束的非线性最小二乘的形式：

$$\min_{\boldsymbol{\theta}\in\mathbf{R}^{N_e}}\{f(\boldsymbol{\theta})=\frac{1}{2}\|\boldsymbol{r}(\boldsymbol{\theta})\|^2=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_e}r_i^2(\boldsymbol{\theta})\mid\|\boldsymbol{l}\|<\|\boldsymbol{\theta}\|\leqslant\|\boldsymbol{u}\|\} \tag{2}$$

其中，向量 $\boldsymbol{l}$、$\boldsymbol{u}\in\mathbf{R}^{N_e}$ 为待识别参数 $\boldsymbol{\theta}$ 的上下边界。为了满足结构损伤识别的要求，$\boldsymbol{l}$ 和 $\boldsymbol{u}$ 的所有元素都分别被置为 0 和 1。N_m 维目标函数向量 $\boldsymbol{r}(\boldsymbol{\theta})$ 由频率和振型两部分信息组成，表示如下：

$$\boldsymbol{r}(\boldsymbol{\theta})_{N_m\times1}=((\boldsymbol{r}^f(\boldsymbol{\theta}))^{\mathrm{T}}_{N_m\times1},(\boldsymbol{r}^\varphi(\boldsymbol{\theta}))^{\mathrm{T}}_{N_m\times1})^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$r_j^f(\theta)=\left|1-\frac{f_j(\theta)}{\hat{f}_j}\right| \tag{4}$$

$$r_j^\varphi(\theta)=1-\frac{((\hat{\varphi}^{(j)})^{\mathrm{T}}\varphi^{(j)}(\theta))^2}{((\hat{\varphi}^{(j)})^{\mathrm{T}}\hat{\varphi}^{(j)})((\varphi^{(j)}(\theta))^{\mathrm{T}}\varphi^{(j)}(\theta))} \tag{5}$$

$$j=1,2,\cdots,N_m$$

其中，$f_j(\theta)$、$\varphi^{(j)}(\theta)$ 分别表示第 j 阶自振频率及振型，上标“^”表示该参数实测模态数据，N_m 维向量 $\boldsymbol{r}^f(\boldsymbol{\theta})$ 用来衡量各阶自振频率的相近程度，N_m 维向量 $\boldsymbol{r}^\varphi(\boldsymbol{\theta})$ 用来衡量各阶振型的相近程度，它包含各阶振型的模态置信度（modal assurance criterion，MAC）。模态置信度用于描述振型的相关程度。

当采用式(2)所示的最小二乘形式时，目标函数的梯度向量和 Hessian 矩阵都具有其特殊的简化形式，即均可用一阶偏导形式的 Jocabian 矩阵来表示，克服了每次迭代中需计算二次导数矩阵（Hessian 矩阵）的困难，很大程度上提高了计算效率。

1.1.2 目标函数的求解

由于信赖域方法既具有牛顿法的快速局部收敛性，又具有理想的全局收敛性，因而本文采用信赖域算法求解上述带边界约束的非线性最小二乘问题，从而识别结构各单元组刚度降低系数。收敛准则定义为：$|(f(\boldsymbol{\theta}_k)-f(\boldsymbol{\theta}_{k-1}))/f(\boldsymbol{\theta}_{k-1})|<\varepsilon$，即目标函数的前后两次迭代值误差小于某一给定精度。本文收敛精度 ε 取为 1.0×10^{-6}。

1.2 数值仿真及试验研究

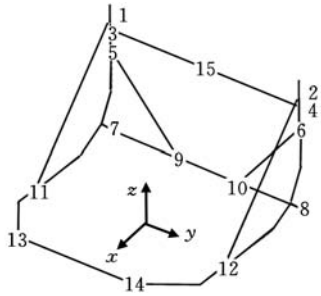
1.2.1 发射台骨架的模态试验

试验时，将发射台骨架离散为 25 个节点，每个节点按 3 个自由度考虑，以便获取发射台骨架的三维模态。根据发射台骨架模型的几何特点，选取其中的 15 个节点作为测量点，共测量 28 个自由度方向。各测点的自由度分布见表 1。

表 1 发射台骨架各测点自由度分布

测点	1	2	3	4	5	6	7	8
自由度	x,z	x,z	y	y	x,z	x,z	x,y	x,y
测点	9	10	11	12	13	14	15	
自由度	x,y	x,y	y,z	y,z	x,z	x,z	x,z	

用橡胶绳将模型悬吊起来，使其处于“自由状态”（无边界约束状态）。采用锤击法进行激振，单点激励，多点响应。采样频率为 10kHz，每个响应信号取 2048 个采样点。加速度信号经电荷放大器放大进入 DH5920 动态信号测试分析系统，测试分析软件采用东华模态分析软件（DHMA）。本发射台骨架模型的测点编号分布及试验现场如图 1 所示。



(a)测点编号分布

(b)试验现场

图 1 发射台骨架模型的测点编号分布及试验现场

1.2.2 发射台骨架的有限元建模及修正

为了获得与实际结构的动力特性比较接近的有限元模型，本文建立了发射台骨架的三维实体有限元模型，如图 2 所示。但是在这种情况下，整个数值模型太过于复杂和庞大，单元、节点及自由

度数目相当可观，采用信赖域算法对其进行反复迭代计算及修正时，计算量相当大。因此在模型修正及损伤识别的第一步中，本文对该模型进行了单元分组，将各个单元组作为一个整体来进行模型修正及损伤识别。

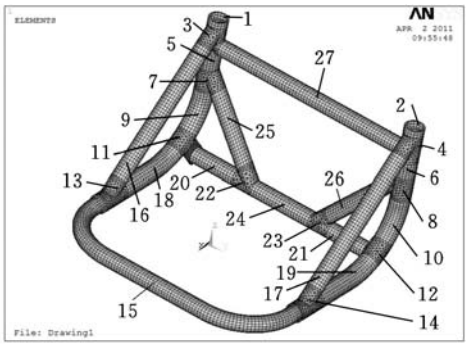


图 2　发射台骨架有限元模型及单元组划分

由于本文建立的有限元模型的几何尺寸（截面特性及各部件长度等）及材料特性等均是按设计要求完成的，所以这些因素在模型修正过程中可以不予考虑。本模型为钢管焊接结构，具有多个焊缝，焊接过程中焊缝及其周围材料的特性变化较大，这将成为有限元模型误差的主要来源。

运用上文提出的模型修正方法，对发射台骨架焊接节点上各单元组（3，4，7，8，11，12，13，14，22，23）的材料特性进行修正，修正后有限元模型的计算模态和实测模态的比较见表 2。从表 2 可以看出，修正后的有限元模型的计算模态和实测模态很接近，说明该有限元模型可用于后续的损伤识别。

表 2　修正后有限元模型的计算模态和实测模态的比较

模态阶次	振型描述	实测频率（Hz）	计算频率（Hz）	频率变化百分比（%）	MAC 值
1	前侧弯管 xy 平面内反对称弯曲，后侧两竖管沿 x 方向反对称摆动	112.139	112.520	0.34	0.926
2	前侧弯管沿 $-y$ 方向摆动，后侧下横管对称弯曲	156.911	149.713	−4.59	0.874
3	前侧弯管沿 $-z$ 方向摆动，后侧上横管沿 $-x$ 方向摆动	267.166	254.800	−4.63	0.937
4	前侧弯管和后侧下横管均沿 $-x$ 方向摆动	292.486	298.630	2.10	0.934
5	前侧弯管、后侧上横管和后侧下横管均沿 $-z$ 方向摆动	438.155	444.175	1.37	0.903
6	前侧弯管 xy 平面内反对称弯曲，后侧整体沿 $-y$ 方向侧摆	528.560	521.250	−1.38	0.891

1.2.3　损伤识别数值仿真研究

（1）损伤工况设置。本文对发射台骨架单损伤（工况 1）、两损伤（工况 2）和微小损伤（工况 3）3 种工况进行数值仿真研究。其中，工况 1 假定 24 号单元组发生 30％的损伤（刚度降低 30％）；工况 2 假定在单元组 24 和 27 处均发生 30％的损伤；工况 3 假定 24 号单元组仅发生 10％的损伤。表 3 表示 3 种工况下发射台骨架模型损伤前后的频率变化。从该表中可以看出，工况 3 的各阶频率变化都不明显。从这里就可以看出，在这种微小损伤引起的频率改变不明显的情况下，仅利用频率进行损伤识别是不够的，还需要将频率与振型一起利用起来进行损伤识别。本文所提出的方法正是同时利用了频率与振型信息。

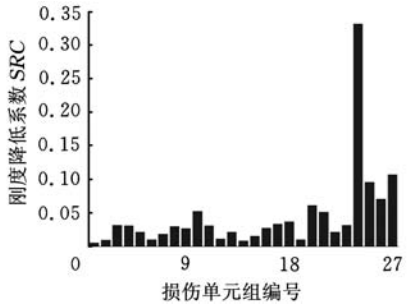
表 3　发射台骨架有限元模型损伤前后的模态频率及其变化

模态阶数	健康状态（Hz）	损伤工况 1		损伤工况 2		损伤工况 3	
		频率（Hz）	变化百分比（%）	频率（Hz）	变化百分比（%）	频率（Hz）	变化百分比（%）
1	112.520	111.280	1.10	111.745	0.69	111.363	1.03
2	149.713	148.174	1.03	148.060	1.11	148.272	0.96
3	254.800	252.150	1.04	248.710	2.39	252.670	0.84
4	298.630	291.413	2.42	291.379	2.43	296.936	0.57
5	444.175	433.637	2.37	430.192	3.15	439.450	1.06
6	521.250	517.833	0.65	515.660	1.07	517.050	0.81

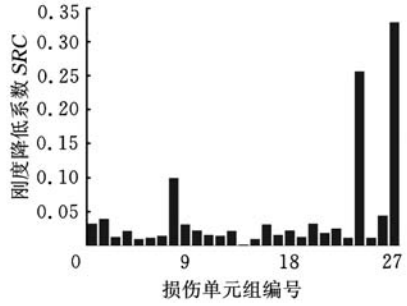
（2）损伤识别结果分析。通过定义刚度降低系数来反映各单元组损伤的程度。从 3 种损伤工况的识别结果（图 3）可以看出，本文所提出的方法对于发射台骨架这样的大型复杂结构的损伤识别是可行的。特别对于工况 3 下的微小损伤，本方法也取得了较好的识别效果，说明本文提出的损伤识别方法具有较高的灵敏度。

1.2.4　损伤识别试验数据验证

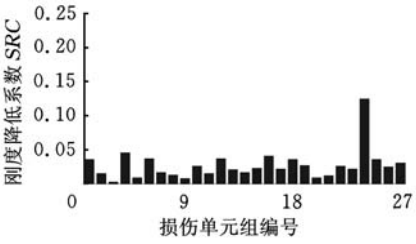
（1）损伤工况设置。对发射台骨架试验模型仍设置了 3 种损伤工况，分别如下：①24 号单元组从左至右 1/4 处被切开，深度为钢管外半径的一半（a＝12mm），如图 4 所示；②24 号和 27 号单元组从左至右 1/4 处均被切开，深度均为钢管外半径的一半；③24 号单元组从左至右 1/4 处被切开，深度仅为钢管的壁厚（a＝5mm）。发射台骨架试验模型损伤前后实测频率和振型的比较分别见表 4 和表 5。



(a)工况 1



(b)工况 2



(c)工况 3

图 3　损伤识别结果

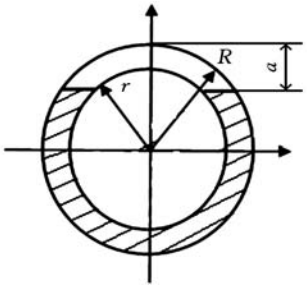


图 4　钢管损伤后截面示意图

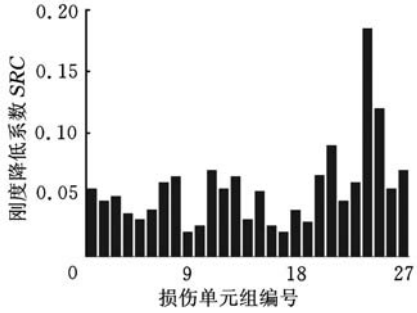
表 4　发射台骨架损伤前后实测频率(Hz)比较

模态阶数	健康状态(Hz)	损伤工况 1		损伤工况 2		损伤工况 3	
		频率(Hz)	变化百分比(%)	频率(Hz)	变化百分比(%)	频率(Hz)	变化百分比(%)
1	112.139	110.570	1.40	102. 45	8.64	110.975	1.04
2	156.911	152.860	2.58	151.772	3.28	154.360	1.63
3	267.166	249.230	6.71	244.835	8.36	257.521	3.61
4	292.486	279.525	4.43	268.390	8.24	283.754	2.99
5	438.155	434.160	0.91	415.327	5.21	434.290	0.88
6	528.560	515.780	2.42	512.250	3.09	518.338	1.93

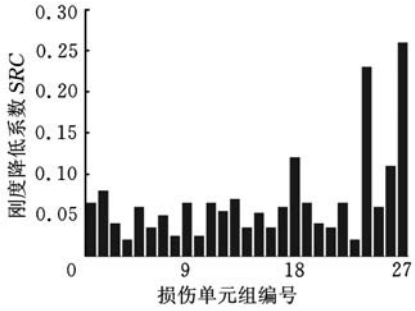
表 5　发射台骨架损伤前后实测振型与修正后有限元模型之间的 MAC 值比较

模态阶数	健康状态	损伤工况 1		损伤工况 2		损伤工况 3	
		MAC 值	变化百分比(%)	MAC 值	变化百分比(%)	MAC 值	变化百分比(%)
1	0.926	0.915	−1.19	0.814	−8.64	0.917	−0.97
2	0.874	0.887	1.49	0.838	−4.12	0.852	−2.52
3	0.937	0.926	−1.17	0.783	−16.44	0.931	−0.64
4	0.934	0.902	−3.43	0.805	−13.81	0.906	−2.99
5	0.903	0.865	−4.21	0.761	−15.73	0.881	−2.44
6	0.891	0.843	−5.39	0.907	1.79	0.865	−2.92

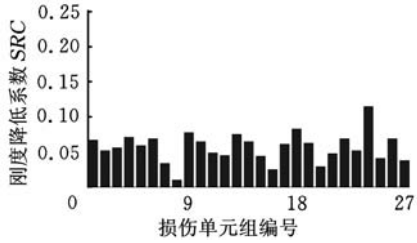
(2)损伤识别结果分析。从三种工况的损伤识别结果(图 5)可以看出,实际发生损伤的单元组基本可以识别出来。特别对于工况 3 下的微小损伤,由于本方法充分利用了损伤前后的振型和频率信息,也实现了损伤的识别,说明本文提出的损伤识别方法具有较高的灵敏度。但由于发射台骨架结构本身的复杂性及模态试验中存在的误差等原因,识别结果还不够清晰。



(a)工况 1



(b)工况 2



(c)工况 3

图 5　损伤识别结果

2　基于模态柔度曲率差的结构损伤识别

上文运用基于模型的损伤识别方法对发射台骨架进行了损伤的模糊识别，得出了损伤属于哪个单元组，但具体位置还不够精确，下面运用基于模态柔度曲率差的损伤识别方法对损伤进行精确定位。

Pandey 等[9]的研究表明：利用柔度矩阵的改变量对结构进行损伤识别，比固有频率或振型对局部损伤进行识别更敏感。本文在前人的基础上，提出了一种识别结构局部损伤的新方法——模态柔度曲率差方法。

2.1　方法介绍

本方法在求模态柔度曲率差之前，先求损伤前后模态柔度的曲率矩阵 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{u}}$ 和 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{d}}$，其元素计算如下：

$$F_j^{\mathrm{u}}(i) = \frac{F_j^{\mathrm{u}}(i-1) + F_j^{\mathrm{u}}(i+1) - 2F_j^{\mathrm{u}}(i)}{2l_i^2} \tag{6}$$

$$F_j^{\mathrm{d}}(i) = \frac{F_j^{\mathrm{d}}(i-1) + F_j^{\mathrm{d}}(i+1) - 2F_j^{\mathrm{d}}(i)}{2l_i^2} \tag{7}$$

式中，$F_j^{\mathrm{u}}(i)$、$F_j^{\mathrm{d}}(i)$ 分别为损伤前、损伤后柔度矩阵第 j 列第 i 行的元素；l_i 为第 i 单元的长度。

模态柔度的曲率矩阵差值为

$$\Delta\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{u}} - \boldsymbol{F}_{\mathrm{d}} \tag{8}$$

将曲率差矩阵 $\Delta\boldsymbol{F}$ 中每行按节点进行叠加取平均值，再按节点将均值组成新的列矩阵：

$$\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{ave}} = [\Delta_1 \quad \Delta_2 \quad \cdots \quad \Delta_n]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

$$\rho_0 = \Delta_i / \Delta_{\max} \tag{10}$$

式中，i 为节点或测点，$i = 1,2,\cdots,n$；$\Delta_{\max}$ 为 Δ_i 的最大值。

ρ_0 与节点位置一一对应，其大小反映了结构损伤后柔度曲率变化的急剧程度，称为模态柔度曲率差。当结构局部出现损伤时，结构的局部刚度降低、局部柔度增大，损伤位置的柔度曲率亦增大。如果相邻两节点处的模态柔度曲率差远大于其余节点的模态柔度曲率差，则这两点之间的单元就是损伤单元。

2.2　试验及结果分析

将单元组 27 划分为 15 个小组，从左至右共布置 16 个传感器(图 6)，测量其损伤前后的局部模态，提取结构的前几阶固有频率和局部振型。测量总共进行两次，测量自由度首先为 x 方向，待测量完毕后将传感器调整为 z 方向。根据式(6)～式(10)，编制 MATLAB 程序，绘制模态柔度曲率差 ρ_0 随节点变化的二维曲线，并将两次测量结果所得曲线进行拟合，则曲线突变处将指示出损伤的精确位置(图 7)。

工况 2 中 27 号单元组的实际损伤位置设置

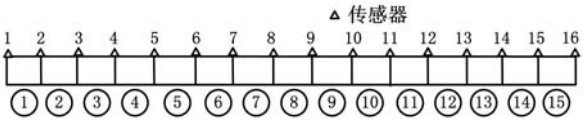


图 6　单元组 27 的分组及传感器布置

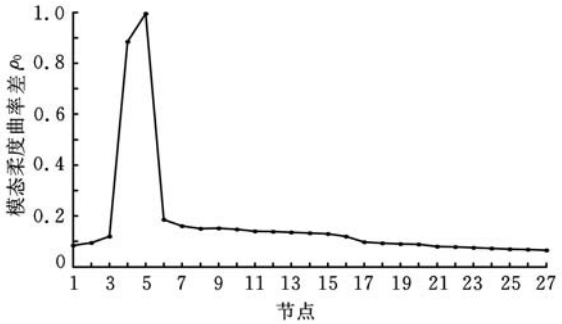


图 7　模态柔度曲率差损伤识别结果

在从左至右四分之一处，即位于节点 4 和节点 5 之间。从模态柔度曲率差的识别结果可以看出，节点 4 和 5 处曲线突变很明显，因此运用模态柔度曲率差方法可以实现损伤的精确定位。

3　结语

本文提出了一种基于模型修正和模态柔度曲率差的大型复杂结构损伤识别两步法。该方法将损伤识别分为两步：第一步，运用基于模型修正的损伤识别方法对结构损伤进行模糊识别，识别出损伤属于结构的哪个单元组；第二步，运用模态柔度曲率差方法，对损伤进行精确定位。对某导弹发射台骨架的数值仿真及试验研究结果表明，本文提出的损伤识别两步法识别效果较为理想，为解决大型复杂结构的损伤识别问题提供了新的思路。

参考文献：

[1]　Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Damage Localization by Directly Using Incomplete Mode Shapes[J]. Journal of Engineering Mechanics — ASCE, 2000, 126(6): 656-660.

[2]　瞿伟廉，陈超. 基于应变模态的钢结构构件焊缝损伤定位方法的研究[J]. 世界地震工程，2002，18(2)：2-7.

[3]　曹晖，张新亮，李英民. 利用模态柔度曲率差识别框架的损伤[J]. 振动与冲击，2007，26(6)：116-120.

[4]　Law S S, Shi Z Y, Zhang L M. Structural Damage Detection from Incomplete and Noisy Modal Test Data[J]. Journal of Engineering Mechanics — ASCE, 1998, 124(11): 1280-1288.

[5]　徐伟华，刘济科. 基于移动载荷响应的多跨连续桥梁损伤检测[J]. 力学与实践，2008，30(5)：49-52.

[6]　张德海，朱浮声. 结构损伤智能诊断研究进展[J]. 力学与实践，2003，25(4)：1-5.

大口径火炮多发连射炮管热力耦合分析

武　锋　郑祖华　吴圣川　祖方遒
合肥工业大学，合肥，230009

摘要：通过建立一维内弹道学两相流模型和经典圆管瞬态热传导模型，研究了大口径火炮多发连射过程的瞬态传热特性，并用ABAQUS软件进一步分析20发连射时炮管的热结构耦合场。得到某155mm火炮药室部温度场和瞬态热应力场分布规律，为进一步评测炮管的疲劳裂纹和确定剩余寿命提供了参考。

关键词：火炮炮管；热力耦合；有限元分析；传热；热应力

中图分类号：TJ34　　DOI：10.3969/j.issn.1004－132X.2012.09.011

Thermo－mechanical Coupling Analysis for a Large Calibre Gun Multiround Continuous Firing Process

Wu Feng　Zheng Zuhua　Wu Shengchuan　Zu Fangqiu
Hefei University of Technology，Hefei，230009

Abstract：The heat conduction process of a large－caliber artillery firing was simulated by using an one－dimensional two－phase flow interior ballistic model and an one－dimensional tube transient heat transfer model，by which the transient temperature field and thermal stress distribution of the barrel champer of a 155mm gun were calculated by ABAQUS after twenty shots. The results can provide the important basis to evaluate the fatigue crack propagation and to predict the life of gun barrel.

Key words：gun barrel；thermo－mechanical coupling；finite element analysis；heat transfer；thermal stress

0　引言

强杀伤力和远射程是现代火炮发展的必然趋势，如何提高炮管的强度和寿命是重要研究课题。在大威力火炮速射过程中，炮管内膛热量来不及向外传递，存在着瞬态极端温度梯度。同时，沿炮管径向分布极端不均匀的热循环不仅会严重烧蚀内壁，而且多发连射后内膛累积的热量对弹药和士兵的安全也造成了严重威胁。因此，探明火炮发射过程产生的连续热冲击特性是研究炮管宏微观失效破坏机理和开发炮管延寿技术的重要前提和基础[1]。

本文尝试建立了某大口径火炮的一维内弹道两相流模型和瞬态传热模型，以连发20发炮弹为条件，获得了炮管的传热特性。基于ABAQUS平台，进一步计算了炮管的瞬态应力场。

1　炮管传热物理过程分析

火炮射击过程中，内膛传热以传导、对流和辐射三种方式进行。研究表明，辐射换热量约为对流换热量的1%，因此，本文主要考虑对流换热这一主要传热形式。射击时，火药燃气与炮管的热作用分为三个阶段：内弹道时期、后效期和间歇期。

文献[2-3]表明，炮管沿半径方向的温度梯度是轴向的1000倍以上。因此，可不考虑热量的轴向传递，将模型简化为不计弹丸运动中摩擦生热的炮管径向一维热传导数学模型。

(1)控制方程。控制方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right)\qquad r_0\leqslant r\leqslant r_1 \tag{1}$$

收稿日期：2011—03—16

[7] Conn A R，Gould N I M，Toint P L. Trust－region Methods(MPS/SIAM Series on Optimization)[M]. Philadelphia：Society for Industrial Mathematics，1987.

[8] Branch M A，Coleman T F，Li Y. A Subspace Interior and Conjugate Gradient Method for Large－scale Bound－constrained Minimization Problems[J]. SIAM Journal on Scientific Computing，1999，21(1)：1-23.

[9] Pandey A K，Biswas M. Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility[J]. Journal of Sound and Vibration，1994，169(1)：3-17.

（编辑　王艳丽）

作者简介：李世龙，男，1987年生。军械工程学院导弹工程系博士研究生。主要研究方向为发射控制系统检测与故障诊断。发表论文7篇。王天辉，男，1986年生。军械工程学院导弹工程系博士研究生。马立元，男，1962年生。军械工程学院导弹工程系教授、博士研究生导师。李永军，男，1972年生。军械工程学院导弹工程系讲师。