

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.034

基于 ABAQUS 的金属结构损伤导波监测参数化建模的二次开发

常康康¹,周储伟¹,杨宇²,王莉^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016;

2. 中国飞机强度研究所 结构损伤监测技术研究室,陕西 西安 710065)

摘要:由于导波的结构损伤识别与定位研究存在着样本数据严重不足的问题,需通过数值仿真产生大量虚拟数据样本。为了提高有限元建模和数据提取的效率,基于 Python 语言的 ABAQUS 二次开发功能,完成金属结构损伤导波监测参数化建模工具的开发,实现有限元模型前后处理的自动化。利用该工具研究裂纹长度对 Lamb 波信号特征的影响,并与现有结论进行比较,验证了参数化建模工具的可靠性。

关键词:数值仿真;导波监测;Python;参数化建模

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)05-0163-04

Secondary Development of Parametric Modeling for Metal Structure Damage Guided Wave Monitoring Based on ABAQUS

CHANG Kangkang¹,ZHOU Chuwei¹,YANG Yu²,WANG Li^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics,Nanjing 210016,China;

2. Structural Injury Monitoring Technology Laboratory,Aircraft Strength Research Institute of China,Xi'an 710065,China)

Abstract:Due to serious deficiency of sample data in the study of structural damage identification and location, a large number of virtual data samples need to be obtained through numerical simulation. In order to improve the efficiency of finite element modeling and data extraction, the parameterized modeling tool for guided wave monitoring of metal structure damage is developed based on the ABAQUS secondary opening function of Python language. The tool is used to study the influence of crack length on the characteristics of Lamb wave signals, and its reliability is verified by comparing with the existing conclusions.

Keywords:numerical simulation;guided wave monitoring;Python;parametric modeling

0 引言

Lamb 波具有传播范围广、在传播过程中信号衰减减小、对微小损伤敏感、能进行大范围监测、精度高、成本低等优点^[1],在健康监测技术中具有重要的应用价值。随着有限元技术的快速发展,众多学者逐渐通过有限元方法开展结构损伤导波监测数值模拟的研究^[2-5],但整个有限元建模过程复杂而繁琐,大大降低了结构损伤导波监测数值模拟的效率。因此有必要对常用被测结构进行参数化建模处理。

ABAQUS 作为世界上最先进的大型通用非线性有限元软件之一,被广泛地应用于机械制造、航空航天、汽车、船舶、土木工程等领域。随着该软件广泛和深入地应用,越来越多的用户开始基于 ABAQUS 平台进行二次开发工作,以满足自身特定的需要。目前,基于 ABAQUS 平台的二次开发有两种:一种是

使用 Fortran 语言完成求解器层次的二次开发,另一种是使用 Python 语言完成有限元模型前后处理的二次开发。Python 语言作为一种解释型语言,具有简洁、易掌握、面向对象等优点,使得整个模型前后处理的二次开发工作变得更加方便。

开孔金属板作为一种在工业中广泛应用的结构,在某些时变载荷下,这些结构通常会在孔边产生裂纹损伤,导致承载能力下降,影响结构的服役寿命^[6]。为解决通过机器学习手段开展基于导波的结构损伤识别与定位研究存在着样本数据严重不足的问题,本文基于 Python 语言的 ABAQUS 二次开发功能,完成金属结构损伤导波监测参数化建模工具的开发,节约试验时间和试验成本。

1 有限元模型建立

1.1 结构损伤导波监测原理

Lamb 波激励、传播和接收示意如图 1 所示。

第一作者简介:常康康(1995—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为导波损伤检测,ckknuaa@163.com。

首先, Lamb 波由激振器产生, 然后通过耦合剂传递到主板结构中, 当遇到主板结构中的损伤时, Lamb 波可能会发生反射、透射和散射等, 最后被接收传感器接收。研究人员通过合理的方法对接收信号进行处理, 可进一步判断损伤的位置、大小等信息。

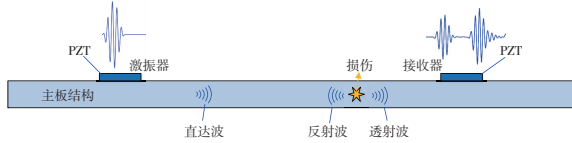


图1 Lamb 波激励、传播、接收示意图

1.2 模型建立

1) 创建模型

本文开发的结构损伤导波监测参数化建模工具可创建孔边裂纹和非孔边裂纹两种金属板模型, 该工具使用板单元离散有限元模型, 提高了计算效率。下面为参数化建模过程中的部分程序:

```
s = mdb.models[ 'Model-1' ]. ConstrainedSketch
(name = '__profile__', sheetSize = 200.0)
s.rectangle( point1 = ( 0.0, 0.0 ), point2 = ( length_0,
width_0 ))
p = mdb.models[ 'Model-1' ]. Part( name = 'Part-1',
dimensionality = THREE_D, type = DEFORMABLE_BODY )
p = mdb.models[ 'Model-1' ]. parts[ 'Part-1' ]
p.BaseShell( sketch = s )
if hole_0 == 1:
s1.CircleByCenterPerimeter( center = ( x_hole_0, y_hole_0 ), point1 = ( x_hole_0, y_hole_0+1 ))
p.CutExtrude( sketchPlane = f1[ 0 ], sketchUpEdge = e1[ 1 ], sketchPlaneSide = SIDE1, sketchOrientation = RIGHT,
sketch = s1, flipExtrudeDirection = OFF )
p.CutExtrude( sketchPlane = f1.findAt( ( 0.1, 0.1, 0.0 ) ),
sketchUpEdge = e1.findAt( coordinates = ( length_0, width_0 * 2.0/3.0, 0.0 ) ), sketchPlaneSide = SIDE1, sketchOrientation = RIGHT,
sketch = s1, flipExtrudeDirection = OFF )
```

可通过裂纹长度 L , 裂纹与圆孔对应角度 α 、裂纹与水平轴夹角 β 确定孔边裂纹的位置, 如图 2 所示。通过在开孔板中去除材料的方式创建裂纹。

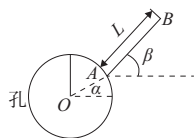


图2 孔边裂纹示意图

在结构损伤导波监测过程中, 压电传感器通常以阵列的方式布置, 以构成压电传感器网络。因此为了提高金属结构损伤导波监测参数化建模

工具的通用性, 增加了多压电传感器创建功能, 实现监测信号的多发多收和单发多收, 程序如下:

```
for i in range(0, VibrationNumber_0):
g1=s.CircleByCenterPerimeter( center=( float( Vibration_exciter_0[i][ 1 ] ), float( Vibration_exciter_0[i][ 2 ] )) ),
point1=( float( Vibration_exciter_0[i][ 1 ] ), float( Vibration_exciter_0[i][ 2 ]+1 )) )
s.RadialDimension( curve=g1, textPoint=( 1, 1 ), radius= float( Vibration_exciter_0[i][ 3 ] ))
p.PartitionFaceBySketch( sketchUpEdge = e1.findAt( coordinates=( length_0, width_0/2, 0.0 ) ), faces=pickedFaces, sketch=s)
```

2) 创建材料

金属结构损伤导波监测模型中包含金属板材料和压电传感器材料。创建传感器材料的程序如下:

```
mdb.models[ 'Model-1' ]. Material( name = 'Material-vibration')
mdb.models[ 'Model-1' ]. materials[ 'Material-vibration' ].
Density( table=(( vibration_density_0, )) )
mdb.models[ 'Model-1' ]. materials[ 'Material-vibration' ].
Elastic( type = ENGINEERING_CONSTANTS, table = (( vibration_E11_0, vibration_E22_0, vibration_E33_0,
vibration_V12_0, vibration_V13_0, vibration_V23_0,
vibration_G12_0, vibration_G13_0, vibration_G23_0, )) )
```

3) 施加激励载荷

本文中的所有模型均调用压电层合板单元实现 Lamb 波的激发。因此, 在建模程序中需要自动完成 INP 文件的修改, 以使得压电层合板单元子程序能够被 ABAQUS 求解器顺利调用, 此过程定义为第一步计算。第一步计算完成后, 建模程序将自动提取结果文件中的节点位移至原始模型中, 完成后续模型参数的设置并提交计算, 此过程定义为第二步计算。第二步计算完成后, 可通过程序自动提取结果文件中接收器的位移数据。提取位移数据的主要程序为:

```
for i in range(0, VibrationNumber_0):
for v in Vibration_exciter_Displacement.values:
nodelabel=v.nodeLabel
X_displacement=v.data[ 0 ]
Y_displacement=v.data[ 1 ]
Z_displacement=v.data[ 2 ]
mdb.models[ 'Model-1' ]. DisplacementBC( name='dis-'+str( nodelabel ), createStepName='Step-1', region=region,
u1=X_displacement, u2=Y_displacement, u3=Z_displacement, ur1=UNSET, ur2=UNSET, ur3=UNSET,
amplitude='Amp-1', fixed=OFF, distributionType=UNIFORM, fieldName='', localCsys=None)
...
```

2 图形界面开发

ABAQUS 创建 GUI 的方式有两种:一种是使用 ABAQUS 软件内部自带的 RSG 对话框构造器创建,另一种是使用 ABAQUS/GUI 工具包进行创建。RSG 对话框构造器可以用来创建常见的控件类型,如单选按钮、参数输入框、复选框、表格等。但是对于相对复杂的 GUI 界面,需要使用到 ABAQUS/GUI 工具包,如 ABAQUS 软件中的工具栏、树控件、按钮等。由于本文开发的金属结构损伤导波监测参数化建模工具的界面较为复杂,因此需使用 ABAQUS/GUI 工具包完成图形界面的

开发。

本文中的参数化建模工具可创建孔边裂纹和非孔边裂纹两种结构形式。针对不同的结构形式,对模型参数进行模块化分类以方便参数的统一输入与管理。图 3 为金属结构损伤导波监测参数化建模工具示意图,并列举了结构和裂纹参数模块、传感器位置模块、传感器材料参数模块、创建激励信号模块的界面,其余模块界面均可在参数化建模面板中调出。参数化建模页面包含了前处理的所有功能,结果提取页面包含了后处理的所有功能。参数化建模工具内部程序文件调用流程如图 4 所示。



图 3 金属结构损伤导波监测参数化建模工具

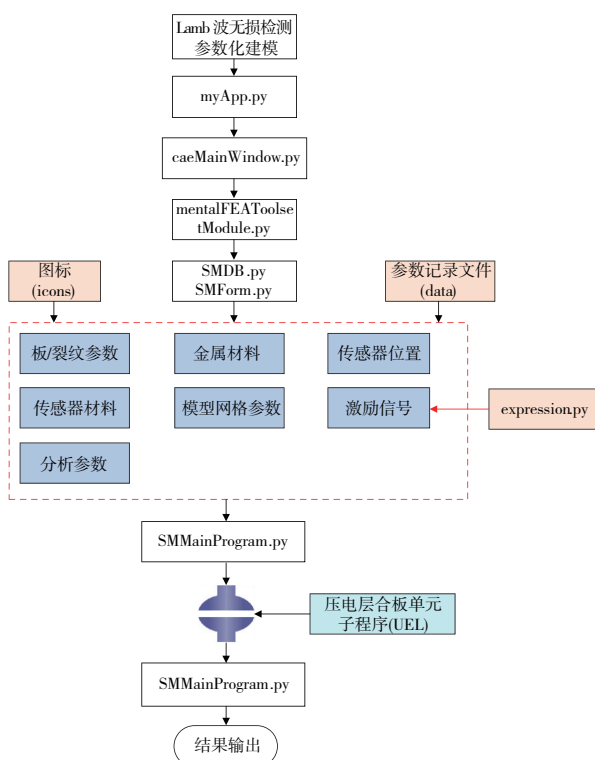


图 4 参数化建模工具内部程序文件调用流程

图 4 中,启动软件后,由 SMDB.py 和 SMForm.py 文件控制参数化建模中的各模块按钮。各按钮分别控制相应 GUI 界面的弹出,收集模型参数,并将参数传入到建模主程序 SMMainProgram.py 文件中,ABAQUS 内置 Python 解释器将执行 SMMainProgram.py 文件中的前处理命令,同时调用压电层合板单元子程序。待计算结束后,ABAQUS 将执行 SMMainProgram.py 文件中的后处理命令以完成结果的自动输出。

3 算例分析

开孔铝板的尺寸为 $400\text{ mm} \times 168\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,模型形状如图 5 所示。以铝板左下角为坐标原点,孔的中心坐标为 $(200, 84)$,直径为 25 mm ;铝板的密度 $\rho = 2\,700\text{ kg/m}^3$;弹性模量 $E = 70\text{ GPa}$;泊松比 $\nu = 0.33$ 。传感器对称布置在孔的两侧,传感器 A 坐标为 $(130, 70)$,传感器 S 坐标为 $(270, 70)$,传感器采用直径为 8 mm ,厚度为 0.45 mm 的 PZT-5H 压电陶瓷,其中传感器 A 作为驱动器,粘

贴在板的两侧,传感器 S 为接收器。在孔的下端设置穿透型裂纹,裂纹长度变化范围为从 0 mm ~ 8 mm,步长为 2 mm。为防止 Lamb 波在传播过程中出现能量泄露和波形失真,选择中心频率为 230 kHz、5 周期的正弦激励信号^[7],信号表达式为

$$A(t) = [H(t) - H(t - N/f_c)] \times [1 - \cos(2\pi f_c t/N)] \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

式中: $H(t)$ 为 Heaviside 函数; f_c 为中心频率; N 为正弦波周期数。

提取不同裂纹长度下 S 传感器的电压信号,如图 6 所示。可以看出,直达波的幅值和相位与裂纹长度近似呈线性关系,其中幅值与裂纹长度

之间呈负相关,相位与裂纹长度之间呈正相关,与文献[8]中的结论相同,由此也证明了本文所开发的金属结构损伤导波监测参数化建模工具的可靠性。

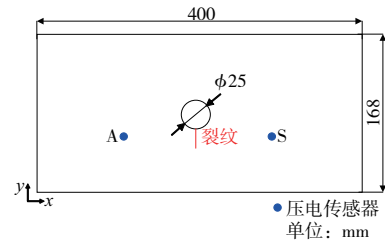


图 5 模型示意图

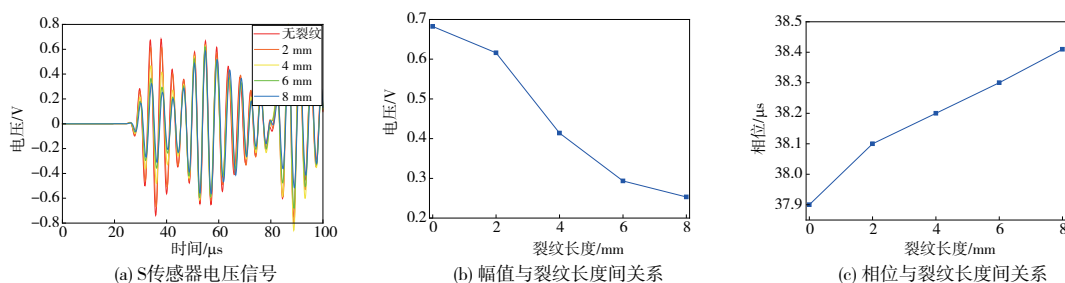


图 6 不同长度裂纹的仿真信号

4 结语

1) 基于 Python 语言完成了金属结构损伤导波监测参数化建模工具的开发工作,该工具可快速创建不同裂纹长度的有限元模型,提高了有限元分析过程的前后处理效率,能够在较短时间内获取大量的虚拟样本数据,解决了通过机器学习手段开展基于导波的结构损伤识别与定位研究存在着样本数据严重不足的问题。

2) 对铝板中孔边裂纹的长度与 Lamb 波信号特征之间的关系进行了研究,仿真结果表明:随着孔边裂纹长度的增加,直达波的幅值和相位与裂纹长度近似呈线性关系,其中幅值与裂纹长度之间呈负相关,相位与裂纹长度之间呈正相关。将本文结论与现有文献中的结论进行比较,验证了金属结构损伤导波监测参数化建模工具的可靠性。

参考文献:

[1] XU C B, YANG Z B, TIAN S H, et al. Lamb wave inspection for composite laminates using a combined method of sparse reconstruction and delay-and-sum[J]. Composite Structures, 2019, 223: 110973.

[2] ALKASSAR Y, AGARWAL V K, ALSHRIHI E. Simulation of lamb wave modes conversions in a thin plate for damage detection[J]. Procedia Engineering, 2017, 173: 948-955.

[3] 宋成杰,郑艳萍,纪志星,等. 吸波边界对 Lamb 波在复合材料中传播的影响研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(8): 10-14.

[4] DE LUCA A, SHARIF-KHODAEI Z, ALIABADI M H, et al. Numerical simulation of the lamb wave propagation in impacted CFRP laminate[J]. Procedia Engineering, 2016, 167: 109-115.

[5] 赵军辉,魏勤,袁媛,等. Lamb 波检测板中裂纹的有限元模拟[J]. 压电与声光, 2013, 35(3): 320-324, 328.

[6] XU L, YU X, HUI L, et al. Fatigue life prediction of aviation aluminium alloy based on quantitative pre-corrosion damage analysis [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(6): 1353-1362.

[7] 陈灵,徐建成,吴键,等. 超声导波在缺陷弯管上的数值模拟研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(6): 64-67.

[8] 赵娜. 金属板裂纹缺陷的超声 Lamb 波和 SH 波监测与评估技术研究[D]. 北京:北京工业大学, 2020.

收稿日期: 2022-11-15