

基于灵敏度分析的隔振器模型修正方法^{*}

陈 沛 贺旭东

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘 要:直接基于正弦试验数据的模型修正研究较少,充分利用工程中积累的正弦试验数据进行结构模型修正具有重要的工程意义。本文针对航天舱段结构中的隔振器,研究采用弹簧阻尼单元进行有限元简化建模,以实测的隔振器前后端振动响应数据获得的传递函数为目标,隔振器的垂向刚度和阻尼为设计变量,利用灵敏度分析的方法对刚度和阻尼参数进行修正。修正后模型分析结果无论是固有频率还是幅值均与试验数据吻合很好,并且模型修正的过程简单、实用性强,可以应用于后续的工程结构。

关键词:灵敏度分析;隔振器;有限元;模型修正

中图分类号: TN911.7 TP202 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 130.20

Model updating method for vibration isolation based on the sensitivity analysis

Chen Pei He Xudong

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The research of model updating based on the sine test data is less. Making full use of the accumulated sine test data plays an important role in model updating process. The vibration isolator for aerospace cabin structure is built by spring damping element. With the isolator vertical stiffness and damping as design variables, the transfer function obtained from two ends of the vibration test data as design objectives, the stiffness and damping parameters are updated by the sensitivity analysis. With the updated model, resonant frequencies agree well with test results, as well as resonant amplitudes. The model updating process is very simple and practical, which can be used in the following engineering structures.

Keywords: sensitivity analysis; vibration isolator; finite element method; model updating

1 引 言

随着计算机技术的飞速发展,有限元技术在航空航天、机械制造和土木建筑等工程行业,尤其是在结构动力学工程分析、信号处理和电子电器等领域,发挥了越来越重要的作用^[1-4]。而随着现代航天器向着大型化、复杂化方向发展,仅凭工程经验建立一个能准确反映结构动力学特性的有限元模型几乎是不可能的。例如结构的物理参数会因环境变化和加工装配精度不够等原因存在一定的误差;复杂结构件之间的连接、边界条件的约束等,在建立有限元模型时要做一定的简化处理;而且建立结构动力学模型时,往往忽略阻尼或凭经验定义阻尼参数,这些会使

得模型与真实的结构存在一定的误差^[5]。因此对有限元模型进行修正的思想便应运而生。

经过多年的发展,基于灵敏度分析的模型修正方法得到了不断的发展,工程中一般采用模态试验实测的模态参数和频响函数进行有限元模型的修正^[6-8]。利用模态参数对有限元模型进行修正,可以使修正后模型的固有频率和振型与试验结果一致;基于频响函数的模型修正方法可以直接利用仿真和试验得到的频响函数进行模型修正,使修正后模型的频响函数与试验的频响函数一致。然而,实际航天工程中,由于受到型号研制周期、结构设计校核等方面的要求,往往仅安排正弦振动试验,因此航天工程中获得了大量的正弦振动响应数据。LIN R M等^[9]在2007年

收稿日期:2015-12

^{*} 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(NS2015008)项目资助

首先提出了利用基础激励下振动试验数据来修正有限元模型;此后,王泽宇等^[10]对该方法进行了改进,利用系统动刚度矩阵对设计参数的灵敏度将算法的修正对象由系统矩阵修改为设计参数。由于阻尼的修正一直是研究的重点和难点,秦玉灵等^[11]详细推导了基于基础激励的阻尼修正方法,并采用国际通用算例 GARTEUR 桁架模型对该方法进行了验证。

本文在以上文献的基础上,采用实测的隔振器前后端振动响应数据获得的传递函数对隔振器垂向的刚度和阻尼进行修正。修正关键在于使得修正后仿真计算传递函数固有频率点和该频率点的响应幅值与试验结果一致,因此修正过程可以分两步进行。采用基于灵敏度分析的模型修正方法分别对隔振器垂向刚度和阻尼进行修正,使得计算分析的传递函数与试验结果一致。修正过程中频率响应分析和灵敏度分析调用 NASTRAN 软件的相应模块完成,优化分析在 MATLAB 软件中实现完成。

2 修正算法介绍

2.1 基于灵敏度分析的修正方法

灵敏度分析方法是工程中得到成功应用的模型修正方法,它通过最小化分析预示和试验实测结果的偏差,达到修正初始模型的目的。将初始模型分析预示的结果记为 $\alpha_A(\omega)$,那么修正后模型预测对应的结果 $\alpha_u(\omega)$ 可以泰勒展开表示为修正参数的函数,取一阶近似得

$$\alpha_u(\omega) = \alpha_A(\omega) + S(\omega)\Delta p \quad (1)$$

式中: Δp 表示修正参数的改变量; $S(\omega)$ 表示灵敏度矩阵;下标 u 表示修正模型预示结果,下标 A 表示初始模型分析预示结果。

定义试验实测结果与有限元模型预测结果的差为残差向量:

$$\varepsilon = \alpha_E(\omega) - \alpha_u(\omega) = \alpha_E(\omega) - \alpha_A(\omega) - S(\omega)\Delta p = \Delta\alpha(\omega) - S(\omega)\Delta p \quad (2)$$

式中: $\Delta\alpha(\omega) = \alpha_E(\omega) - \alpha_A(\omega)$,下标 E 表示试验数据。

将式(2)表示的残差向量的二范数最小化,可以得到模型修正的目标函数:

$$\min J = \varepsilon^T \varepsilon = \{\Delta\alpha(\omega) - S(\omega)\Delta p\}^T \cdot \{\Delta\alpha(\omega) - S(\omega)\Delta p\} \quad (3)$$

根据极值定理得:

$$S\Delta p = \Delta\alpha \quad (4)$$

至此,阻尼的修正问题转化为迭代求解以上线性方程组的问题。

2.2 MATLAB 优化技术

进行优化设计首先要建立数学模型,即选取合理的设计变量,列出目标函数,并给定相应的约束条件。其中,优化目标函数可表示为

$$F = \min \{f(x)\} \quad (5)$$

式中: x 为优化设计的变量, $x = [x_1 \cdots x_2 \cdots x_{n-1} \ x_n]^T$ 。

约束条件:

$$\begin{aligned} g_i(x) &\geq 0 (i = 1, \cdots, \alpha) \\ h_j(x) &= 0 (j = 1, \cdots, \beta < n) \end{aligned} \quad (6)$$

利用 MATLAB 软件进行模型修正优化设计的步骤如下:

- 1) 设定待优化的参数,并赋予合适的初始值;
- 2) 给定约束条件;
- 3) 在 MATLAB 优化工具箱中选择合适的优化方法;
- 4) 定义优化控制参数,进行优化分析,最后查看分析计算结果。

3 舱段结构中隔振器的简化建模及修正

舱段结构中隔振器对整个系统只提供刚度和阻尼,所以可以采用弹簧阻尼单元对其进行简化建模。如图 1 所示为某舱段结构的局部有限元模型,图中设备通过隔振器与舱段壳体连接,左下角为舱段结构的总体坐标系。如图 2 所示为 NASTRAN 软件提供的 6 自由度广义弹簧-阻尼单元(BUSH),可为非线性或随频率变化的。舱段壳体的材料为铝合金,弹性模量为 $E = 7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,密度为 $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.3$,设备简化为刚性体,质量为 $m = 1.6 \text{ kg}$ 。在振动台上对设备舱进行扫频试验,扫描激

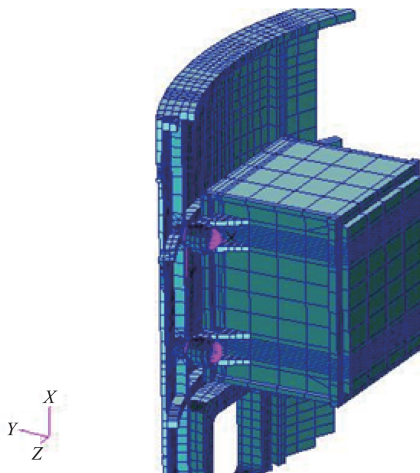


图1 设备局部有限元模型

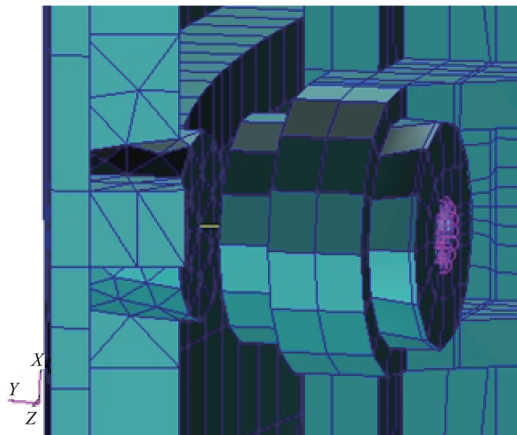


图2 BUSH 单元

振位置为设备舱大端框(端部),对基础激励采用多点平均控制,振动量级为 1g,采集设备隔振器前后端的加速度响应,计算隔振器前后端运动传递率。

3.1 隔振器刚度修正

舱段结构的正弦振动试验在 NASTRAN 中通过频响分析进行模拟,频响分析时设定舱段壳体所受基础激励均为单位正弦加速度激励。BUSH 单元可以设置随频率变化的刚度参数,在传递函数共振点处设置 BUSH 单元的垂向初始刚度均为 500 N/mm。以 BUSH 单元的刚度为待修正参数,传递函数共振点处的频率值为目标,基于灵敏度的分析方法完成 BUSH 单元刚度的修正。修正后 BUSH 单元固有频率点处的垂向刚度如表 1 所示。

表 1 修正后 BUSH 单元的垂向刚度

固有频率/Hz	63.4	160.1
刚度/(N·mm ⁻¹)	70.8	416.1

修正后设备仿真各阶固有频率与试验对比如表 2 所示,通过对比发现两者误差均在 5% 以内,修正后设备模式与试验模型基本吻合,满足工程要求,说明采用本文的修正方法是正确的。该修正结果可用于下一步阻尼的修正。

表 2 设备试验与计算固有频率

模态阶数	1	2
试验频率/Hz	63.4	160.1
计算频率/Hz	64.4	163.4
误差	1.6%	2.1%

3.2 隔振器阻尼修正

BUSH 单元可以设置随频率变化的阻尼系数,由于阻尼对共振频率处的响应影响很大,所以只需在共振峰处设置相应的阻尼系数,即可保证分析传递函数的幅值与试验曲线趋于一致,从而完成 BUSH 单元的阻尼修正。扫频试验时沿隔振器垂向扫描,得到垂向隔振器前后端运动传递率。BUSH 单元 6 自由度阻尼系数用 $C_1 \sim C_6$ 表示,由于 BUSH 单元的 6 自由度阻尼是耦合的,基于垂向隔振器前后传递函数进行阻尼修正时,通过灵敏度分析,发现 C_1 、 C_4 对垂向传递函数共振频率点处 $f_{x1} = 64.4$ Hz, $f_{x2} = 163.4$ Hz 的幅值影响很大,其他阻尼系数影响甚微。所以只需修正阻尼系数 C_1 、 C_4 ,就可使垂向隔振器前后传递函数的幅值与试验曲线一致。在共振频率点 $f_{x1} = 64.4$ Hz 处,阻尼系数 C_1 、 C_4 变化过程如图 3 所示,优化后 $C_1 = 0.38$ N·s·mm⁻¹, $C_4 = 0.35$ N·s·mm⁻¹。采用类似的方法,得到垂向隔振器前后传递函数固有频率点处的阻尼系数如表 3 所示。

表 3 固有频率点处阻尼系数

频率/Hz	64.4	163.4
C_1 /(N·s·mm ⁻¹)	0.38	0.32
C_4 /(N·s·mm ⁻¹)	0.35	0.24

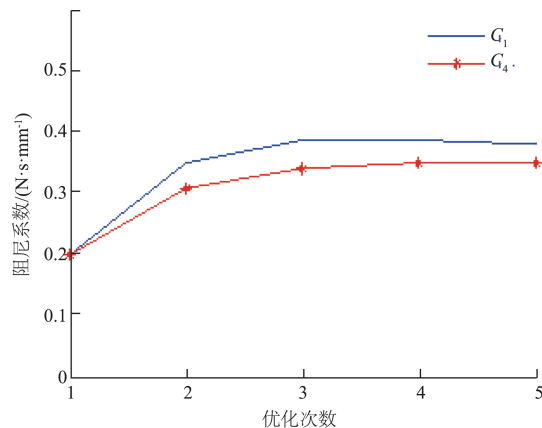


图 3 阻尼系数 C_1 、 C_4 变化过程

修正完频率和阻尼后,得到设备垂向的隔振器前后传递函数曲线,将它们与试验数据进行对比,如图 4 所示。采用本文的模型修正方法对舱段中其他两个隔振器的刚度和阻尼进行修正,相应的传递函数曲线与试验对比如图 5 和图 6 所示。通过对比分析发现,仿真的传递函数曲线与试验曲线基本一致,表明本文对舱段结构中隔振器的简化和修正方法是正确的。

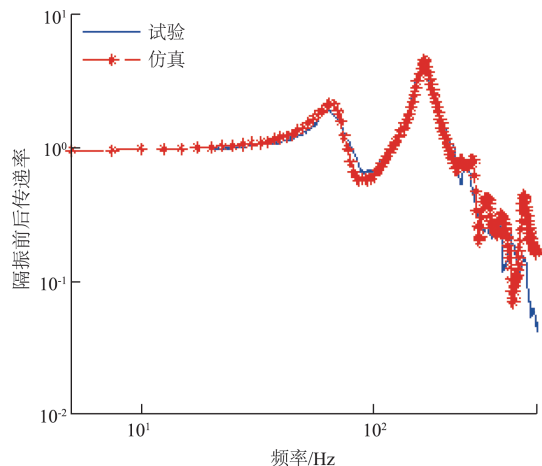


图 4 隔振器 1 垂向前后传递函数

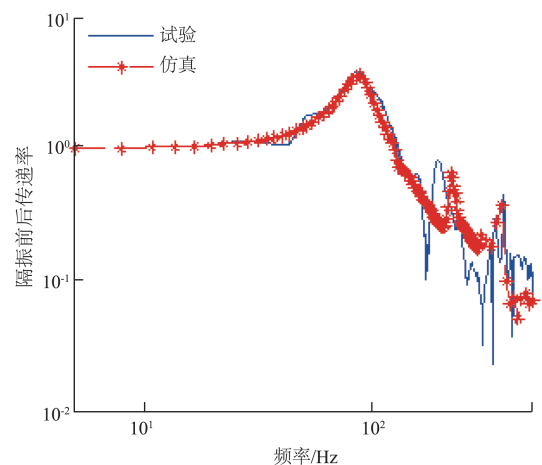


图 5 隔振器 2 垂向前后传递函数

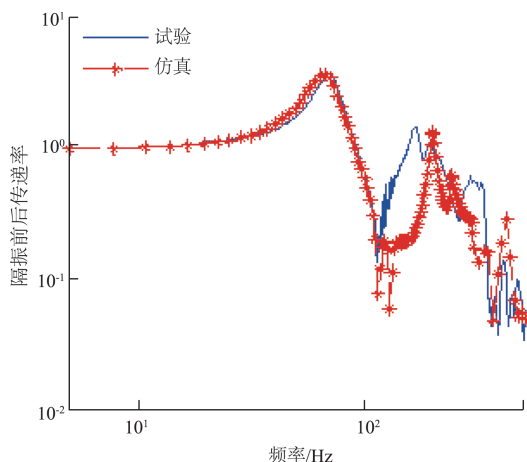


图6 隔振器3垂向前后传递函数

4 结论

本文利用基于灵敏度分析的模型修正方法对航天器结构有限元模型进行修正,并以航天舱段结构中的隔振器为对象进行了仿真分析。得出的结论如下:

1)根据基础激励下的正弦振动试验数据,利用其传递特性可以修正有限元模型。

2)利用有限元软件 NASTRAN 和 MATLAB 联合编程,可以完成有限元模型的修正,使得模型修正技术能应用在构型复杂、规模大的结构中。

3)有限元分析结果与试验结果的一致表明了该方法的可行性,因此本文的方法可以应用于后续的航空航天实际工程结构,且能满足工程上的精度要求。

参考文献

- [1] 孙梁,刘荣梅,姚恩涛. 基于 ANSYS LS-DYNA 模拟敲击声振法检测叶片脱层[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(12):65-68,81.
- [2] 廖宁波,周静雷. 基于 ANSYS Workbench 的微型扬声器振膜的有限元分析[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9):45-49.

- [3] 许西宁,郭保青,余祖俊,等. 半解析有限元法求解钢轨中超声导波频散曲线[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10):2392-2398.
- [4] 陈新,张桂香. 电磁感应无线充电的联合仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(4):434-440.
- [5] 王亮,商霖,李炳蔚,等. 基于灵敏度分析技术与优化设计的导弹模型修正方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2013,324(1):49-52.
- [6] 李伟明,洪嘉振. 基于频响函数的模型修正方法[J]. 上海交通大学学报, 2011(10):1455-1459.
- [7] 殷海涛,姜金辉,张方. 基于试验模态参数及结构动力学优化设计的有限元建模[J]. 国外电子测量技术, 2012,31(9):18-22.
- [8] 高庆,王建民,王晓晖,等. 基于 Nastran 动力学优化的频响函数模型修正方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(3):39-42,47.
- [9] LINR M, ZHU J. Finite element model updating using vibration test data under base excitation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007(303):596-613.
- [10] 王泽宇,刘闯,冯皎齐. 基于振动试验数据的有限元模型修正技术研究[J]. 航天器环境工程, 2010,27(4):472-476.
- [11] 秦玉灵,韩增尧,邹元杰,等. 典型阻尼结构正弦振动响应模型修正方法[J]. 中国空间科学技术, 2014, 34(3):8-14.

作者简介

陈沛,1987年9月出生,硕士研究生,主要研究方向为结构动力学仿真、振动测试与数据处理。

E-mail:jschenpei2006@126.com

贺旭东,工学博士,副教授,主要研究方向为结构振动控制、有限元建模及动力学修正、多场耦合动力学控制。

E-mail:hexudong@nuaa.edu.cn