

基于随机抽样与距离判别的 GARTEUR 模型修正与确认研究

毕司峰, 邓忠民*

北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191

摘要: 提出了一种基于随机抽样技术与距离判别分析的结构有限元随机模型修正(SMU)方法,并将其应用到 GARTEUR 飞机模型的有限元模型修正过程中。传统的模型修正方法以灵敏度分析及优化分析方法为核心,对有限元模型的输入参数进行修正。而本文的随机模型方法充分考虑了有限元建模过程与试验测量中普遍存在的不确定性,利用 Monte Carlo 抽样方法进行大量的随机抽样实验,完成不确定性从输入参数向输出特征的传递分析;在参数修正过程中,利用距离判别分析计算试验与仿真两个数据集之间的统计学差异,并通过迭代程序逐步修正输入参数使仿真数据逐步收敛于测量数据;利用径向基函数,在修正过程中引入代理模型,在保证精度的同时大大降低了随机模型修正的计算量。利用 MCS. Patran 的二次开发语言 PCL 开发了随机抽样实验的相关程序,并可以自动收集数据用于参数修正的迭代运算。通过普遍认可的三级确认准则对 GARTEUR 有限元模型可靠性进行了确认分析,结果表明提出的随机模型修正方法具有可行性和工程应用价值。

关键词: 模型修正; 模型确认; 不确定性; Monte Carlo 法; 距离判别分析; GARTEUR

中图分类号: V214; TB12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893(2013)12-2757-11

随着航空航天技术的发展,有限单元法(Finite Element Method, FEM)作为一个具有巩固理论基础和广泛应用能力的数字化分析工具,已成为飞行器结构动力学数值分析的主要方法。然而,由于试验观测以及有限元建模过程中不确定性的普遍存在,有限元分析结果与试验测量数据之间总是存在差异。通过修正有限元模型使其仿真结果更好地预报试验观测数据,即模型修正技术,长期以来受到人们的广泛关注^[1-3]。

模型修正技术的发展可以分成矩阵型修正和参数型修正两个阶段。参数型修正方法直接将设计参数(尺寸、密度和弹性模量等)作为修正对象,因其物理意义明确、更具有工程应用价值,而逐渐

成为模型修正的主流。传统的模型修正技术主要以局部灵敏度分析选择待修正的输入参数,以优化分析方法为核心对输入参数进行修正^[4]。然而,对输出特征具有显著影响的输入参数并不一定具有不确定性^[5]。同时,通过求解优化问题修正输入参数往往需要计算结构灵敏度矩阵并进行梯度运算,计算效率低,并且容易陷入局部最优解导致优化计算失败^[6-7]。对于具有复杂非线性的瞬态冲击、爆炸响应等动力学问题,以上灵敏度分析及优化计算方法将更加难以实现^[8-10]。

因此,本文提出一种以输入参数的不确定性为主要研究对象的随机模型修正方法。基于工程经验与结构设计准则,假定有限元模型的待修正

收稿日期: 2013-03-22; 退修日期: 2013-04-23; 录用日期: 2013-06-17; 网络出版时间: 2013-07-15 10:12

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130715.1012.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(10972019); 北航博士创新基金

* 通讯作者. Tel.: 010-82339526 E-mail: dengzhongmin@buaa.edu.cn

引用格式: Bi S F, Deng Z M. Stochastic model updating and validation of the GARTEUR structure based on random sampling and distance discrimination. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2013, 34(12): 2757-2767. 毕司峰, 邓忠民. 基于随机抽样与距离判别的 GARTEUR 模型修正与确认研究. 航空学报, 2013, 34(12): 2757-2767.

参数服从给定的概率分布(正态分布和均匀分布等)。通过 Monte Carlo 抽样(MCS)方法,得到结构输出特征的随机样本,在统计意义下计算此样本与试验观测数据的统计学距离,并在迭代程序中修正此样本使其逐渐收敛于试验数据。最终得到能够反映实际结构的准确有限元模型,以及用于下一步动力学仿真预报的精确输入参数。

本方法主要包括 3 个方面的内容:用于完成随机抽样与不确定性传递的 Monte Carlo 方法;用于计算试验与仿真数据间统计学差异的距离判别分析;利用径向基函数法构建结构有限元模型的代理模型,以减少随机抽样实验的计算量,提高修正效率。根据以上内容,利用 PCL 语言编制了内嵌于 MSC.Patran 的接口程序,自动进行 Monte Carlo 抽样计算,自动提取有限元分析数据并提交 MATLAB 进行迭代分析,大大提高了此方法的计算效率与工程应用领域的可操作性。

为了对修正后模型的可靠性进行验证与评估,Link 等^[11]提出了有限元模型的三级确认准则:

- 1) 能够准确计算修正频段范围内的固有频率值,这里指用于模型修正的基准试验数据。
- 2) 能够准确预测修正频段以外的固有频率值以及振型数据,这里称为评价数据。
- 3) 同时对试验结构与有限元模型作一定修改后,有限元模型仍能准确预测试验结构的各项动力学特征。

本文用以上方法对 GARTEUR 有限元模型进行了修正与确认研究,并且通过以上的三级确认准则验证了有限元修正结果的可靠性。

1 理论基础

1.1 随机抽样与不确定性传递

为了描述有限元模型的不确定性,假定结构的输入参数向量为随机向量,具有以下表达形式:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x}_0 为输入参数的均值; $\Delta \mathbf{x}$ 为均值为 0 的随机向量。这里的输入参数为有限元建模过程中具有明显不确定性并且对结构输出特征具有显著影响的随机变量,例如结构的尺寸、密度和弹性模量等。基于工程经验与结构特点,假定以上输入变

量服从特定的概率分布,并具有给定的均值和方差等数字特征。

不确定性的结构系统可以描述为输入向量与输出向量之间的一组复杂的函数关系式,即

$$\begin{cases} \mathbf{y} = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon} \\ \mathbf{y} = [y_1 \quad y_2 \quad \cdots \quad y_q]^T \\ \mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_p]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 分别为输入输出变量; p 和 q 分别为输入输出变量的个数; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为均值为 0 的随机误差。通过不确定性的传递,固有频率和振型等结构输出特征具有与输入参数类似的表达形式,其为

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_0 + \Delta \mathbf{y} \quad (3)$$

式中: \mathbf{y}_0 为均值; $\Delta \mathbf{y}$ 为均值为 0 的随机向量。

如图 1 所示, Monte Carlo 法就是通过随机抽样,在输入参数空间产生大量服从特定概率分布的随机数。将此输入参数样本代入有限元模型(或代理模型),计算得到输出特征样本,用以描述与分析输出变量的统计学特性。图中: x_1 、 x_2 和 y_1 、 y_2 分别为结构的两个输入参数和输出特征; $\mathbf{X}_{\text{analysis}}$ 和 $\mathbf{Y}_{\text{analysis}}$ 分别为输入参数与输出变量的数据样本。

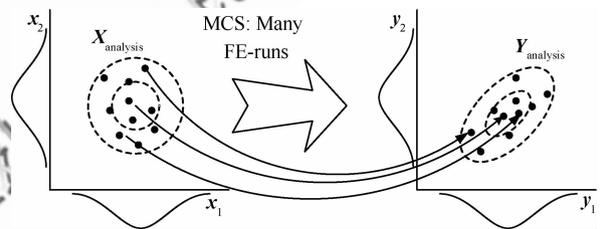


图 1 Monte Carlo 随机抽样实验原理图^[12]

Fig. 1 Strategy of Monte Carlo random sampling^[12]

1.2 距离判别分析与参数迭代修正

仿真与试验数据的距离判别分析以及输入参数的修正原理如图 2 所示,图中 j 为迭代次序。为了对样本数据 $\mathbf{Y}_{\text{analysis}}$ 与试验测量数据 \mathbf{Y}_{test} 之间的差异进行评价与量化,需要计算样本数据中每一个仿真数据点与试验数据的均方根误差(Root-Mean-Square Error, RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\omega_i - \bar{\omega}_i}{\bar{\omega}_i} \right)^2} \quad (4)$$

式中: ω_i 和 $\bar{\omega}_i$ 分别为第 i 阶固有频率的仿真值与测量值; m 为结构固有频率的阶数。

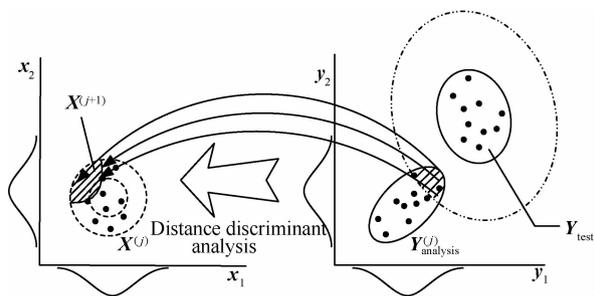


图2 距离判别分析原理图

Fig. 2 Procedure of distance discrimination analysis

在每次迭代中,所有数据点的均方根误差按照从小到大的顺序排列,然后按照一定的截断比率 θ 截取更加接近于观测值的仿真样本,称之为优质小样本,其样本容量为

$$n' = n\theta \quad (5)$$

式中: n 为仿真数据中样本点的个数。截断比率 θ 在迭代程序开始之前事先定义,依据多次运算经验,其取值范围一般为 $[0.01, 0.10]$,其大小取决于初始有限元数据与试验数据的差异程度。一般来说, θ 取值越大,修正过程收敛越快,但有可能导致最后修正精度下降; θ 取值过小,则修正过程收敛速度过慢,需要更多计算时间。

在得到输出特征的优质小样本后,可以根据之前的随机抽样实验反推得到与之对应的输入参数小样本。输入参数的均值可以由式(6)得到,并传递到下一次迭代中进而产生新的随机输入样本进行新一轮的随机抽样实验。

$$\bar{\mathbf{x}}^{(j+1)} = \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{n'} \mathbf{x}_k^{(j)} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}_k^{(j)}$ 为输入参数小样本的第 k 个观测值; $\bar{\mathbf{x}}^{j+1}$ 为第 $j+1$ 次迭代的输入参数均值。

在每一次迭代中,输入变量的概率分布采用固定的变异系数(Coefficient of Variation, CV),即标准差与均值之比。这里的变异系数决定了每一次迭代的步长,依据多次运算经验,其取值范围一般为 $[0.01, 0.10]$,其效果类似于距离判别过程中的截断比率,取值越大,迭代程序收敛越快,但过大的步长可能影响收敛结果的精度与准确性。

当仿真分析结果满足以下条件时,迭代程序

即可终止。这主要表现为输入参数均值不再发生变化,输出响应特征与试验数值近似相等,输出的均方根误差达到最小值。

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}}^{(j+1)} \cong \bar{\mathbf{x}}^{(j)} \\ \bar{\mathbf{y}}_{\text{analysis}}^{(j)} \cong \bar{\mathbf{y}}_{\text{test}} \\ \text{RMSE}^{(j)} \cong 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\bar{\mathbf{y}}_{\text{analysis}}$ 和 $\bar{\mathbf{y}}_{\text{test}}$ 分别为有限元分析与试验测量的输出参数均值。

1.3 径向基函数与代理模型

Monte Carlo 随机抽样法原理及程序简单,适用范围广,但为了获得较高模拟精度,需要的样本点数往往十分巨大^[13]。对于动辄成千上万的样本容量而言,若每次抽样实验都进行有限元分析,则带来的计算量是工程上无法接受的^[12-13]。在 Monte Carlo 法中利用代理模型(Metamodel)代替复杂结构的有限元模型,可以在短时间内进行大量随机抽样实验,在大大减少计算量的同时,得到与有限元分析近似的计算精度。

构造代理模型之前,需进行一定数量的有限元分析以提供样本数据。一般来讲,设计空间中样本点越多,得到的代理模型越精确,但这受计算成本的限制。采用试验设计方法^[14],可以在整个输入参数设计空间中,合理高效地安排试验,从而得到更加全面的有限元样本数据。

利用径向基函数构造代理模型,在计算精度、效率等方面具有一定优势,并且尤其适用于输入输出间具有复杂非线性的情况^[15-16],其基本思路是对欧氏距离基函数加权差值。假设事先进行了 n 次有限元分析,即得到 n 组样本数据,模型输入参数个数为 p ,则径向基函数表达式为

$$y = \sum_{k=1}^n \lambda_k \phi(r_k) + \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_j \quad (8)$$

式中: λ_k ($k=1, 2, \dots, n$)、 β_0 和 β_j ($j=1, 2, \dots, p$) 为待定系数; $\phi(r_k)$ 为基函数。基函数有多种形式,这里采用比较常见的高斯函数:

$$\phi(r_k) = \exp(-cr_k^2) \quad (9)$$

式中: r_k 为已经归一化处理的输入变量与第 k 个样本输入点的几何范数,其表达式为

$$r_k = \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k\|}{\max(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|)} \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

将 n 组已知数据代入式(8),可以得到一个 n 维线性方程组为

$$y_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j \phi(r_{ij}) + \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k x_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式(8)中共有 $n + p + 1$ 个待定系数,但式(11)为 n 维线性方程组,为了使式(8)具有更好的数值稳定性并且易于求解,引入向量 λ^T 与 x 的正交条件^[16-17],得到另一个 $p + 1$ 维线性方程组,其为

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j = 0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{jk} = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, p) \end{cases} \quad (12)$$

将式(11)与式(12)合并得到如式(13)所示的 $n + p + 1$ 维线性方程组,求解即可得到待定系数 λ 和 β 。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \mathbf{A} = [\phi(r_{ij})] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ \boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_n]^T \\ \boldsymbol{\beta} = [\beta_0 \quad \beta_1 \quad \dots \quad \beta_p]^T \\ \mathbf{y} = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_n]^T \\ \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

2 GARTEUR 结构的随机模型修正与确认

2.1 GARTEUR 结构初始有限元建模

GARTEUR SM-AG-19 飞机模型是由法国航空航天研究院 (ONERA) 在 1995 年设计制造的一个标准飞机模型,旨在比较与考核不同振动试验分析技术。该模型具有真实飞机的高柔度、模态密集等特点,随后被欧洲学术界广泛接受为振动模态试验与模型修正技术的基准参考模型。如图 3 所示,该模型全长为 1.5 m,翼展为 2.0 m,制造材料为铝。由于螺栓及其他连接结构的存在,机身各个连接部位分布着 0.2~1.012 5 kg 不等的集中质量,在机翼上方附着有一条 1.1 mm ×

76.2 mm × 1 700 mm 的阻尼层,这使得机翼的密度、弹性模量和剪切模量等参数发生变化,增加了有限元建模的难度。

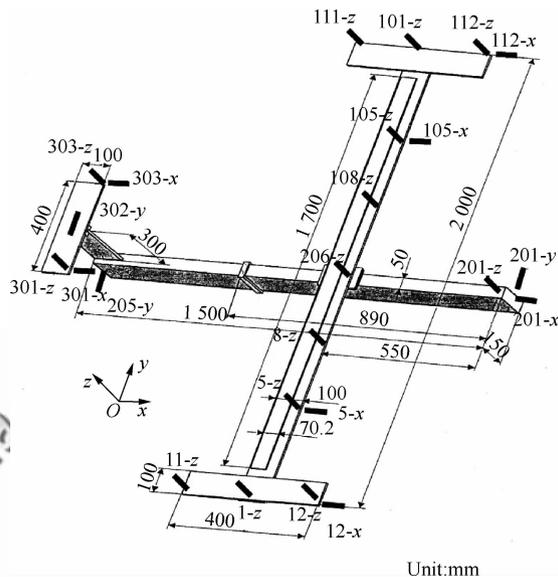


图 3 GARTEUR 飞机结构的几何尺寸^[11]

Fig. 3 Geometric details of the GARTEUR structure^[11]

在 MSC. Patran 中建立有限元模型,如图 4 所示,该模型包含 1 704 个节点,846 个六面体单元以及 6 个集中质量点。根据 GARTEUR 模型的结构特点,机翼与垂尾是各阶模态中主要的变形部件,由于阻尼层的存在以及机身对垂尾在结构上的增强,其结构参数也具有明显的不确定性。据此选定 6 个结构参数作为待修正输入参数,其详细介绍如表 1 所示。输出特征选定结构的固有频率,以文献[11]中斯旺西大学的试验测试数据为参考。其中,前 10 阶固有频率作为模型修正的基准数据,后 4 阶固有频率以及振型作为评价数据,用于检验修正结果是否满足引言中的第 2 条确认准则。对于第 3 条确认准则,将在 2.5 节进行检验。

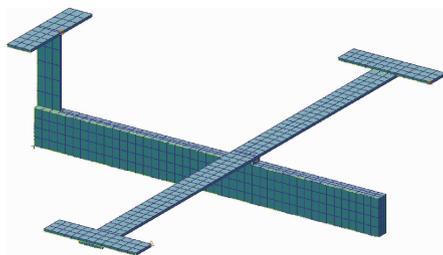


图 4 GARTEUR 结构的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the GARTEUR structure

表 1 不确定性输入参数描述

Table 1 Description of the uncertain input parameters

Input parameter	Description
E_w	Elastic modulus of the wing
μ	Poisson's ratio of the wing
ρ	Mass density of the wing
E_v	Elastic modulus of the vertical tail
M_t	Lumped mass of the connection between the fuselage and the vertical tail
M_d	Lumped masses located at the winglets

2.2 代理模型的构建及精度检验

根据有限元建模过程中参数的不确定性特征,设定输入参数变化范围如表 2 所示。在此设计空间内,每个输入参数取 8 个水平,进行 6 因素 8 水平试验设计^[14],共安排 64 次有限元分析,将得到的样本数据构建径向基函数代理模型。限于篇幅,仅给出第 3 与第 5 个输入参数对于第 5 阶固有频率的代理模型示意图,如图 5 所示。

表 2 输入参数的变化范围及修正结果

Table 2 Intervals and updated results of input parameters

Input parameter	Interval	Initial value	Updated value
$E_w/(10^{11} \text{ Pa})$	[0.5, 0.9]	0.7	0.898 1
μ	[0.2, 0.4]	0.3	0.279 2
$\rho/(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	[2.7, 3.3]	2.7	2.958 9
$E_v/(10^{11} \text{ Pa})$	[0.5, 0.9]	0.7	0.669 3
M_t/kg	[0.1, 0.5]	0.3	0.241 1
M_d/kg	[0.1, 0.5]	0.3	0.323 1

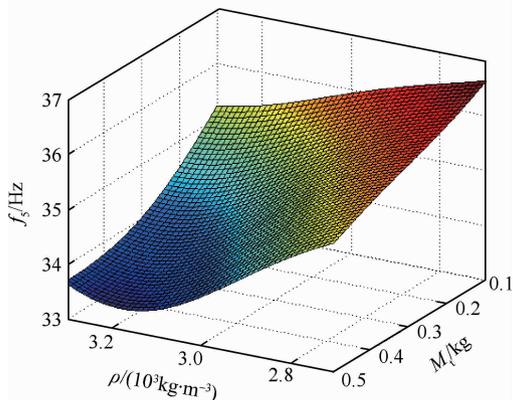


图 5 径向基函数代理模型示意图

Fig. 5 Skematic of radial basis function metamodel

为了检验代理模型的精度,在输入参数空间另取 30 个检验点,分别利用代理模型与有限元模型计算并比较输出响应。针对前 10 阶固有频率分别计算 30 个检验点中的最大、最小及平均绝对误差如表 3 所示。结果显示,第 3 阶与第 5 阶固有频率的平均绝对误差分别为 1.17% 和 1.29%,其余固有频率的平均绝对误差普遍低于 0.5%,这显示了径向基函数代理模型在设计空间内具有很高的拟合精度,可以代替有限元模型用于后续的随机模型修正。

表 3 代理模型精度检验结果

Table 3 Precision assessment result of the metamodel

Mode No.	Error/%		
	Maximum	Minimum	Mean
1	0.38	0.02	0.12
2	0.36	0.01	0.15
3	5.53	0.01	1.17
4	1.58	0.05	0.48
5	5.36	0.06	1.29
6	0.50	0.03	0.25
7	0.81	0.01	0.18
8	1.27	0.03	0.39
9	1.01	0.02	0.34
10	1.43	0.01	0.49

2.3 基准数据的修正结果分析

选定结构前 10 阶固有频率作为模型修正的基准数据。设定 6 个待修正输入参数均服从正态分布,初始均值由表 2 给出,变异系数为 0.01。每次迭代中,利用 Monte Carlo 法进行 10^4 次随机抽样,距离判别分析中截断比率 θ 取值为 0.01。经过 30 次迭代,修正结果满足式(7)所示收敛条件。

结构输入输出变量的修正结果分别如表 2 和表 4 所示。表 2 中的输入参数初始值是根据结构的设计手册给出的,经过修正后其修正值都发生了一定变化。由于阻尼层的存在,GARTEUR 飞机模型机翼密度将会有约 10% 的增加^[18]。表 2 数据中机翼密度由初始的 2700 kg/m^3 修正为 2958.9 kg/m^3 ,与文献^[18]中的说明基本吻合。

这表明修正结果基本可以反映实际结构的客观物理特性。

表 4 中前 10 阶固有频率初始值的最大误差为 -13.79% , 最小误差为 0.15% , 平均绝对误差为 7.36% , 这说明由于不确定性的存在, 初始有限元模型与实际结构有较大误差, 需要进行模型

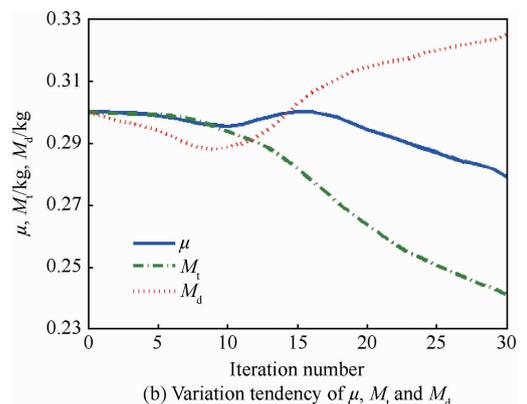
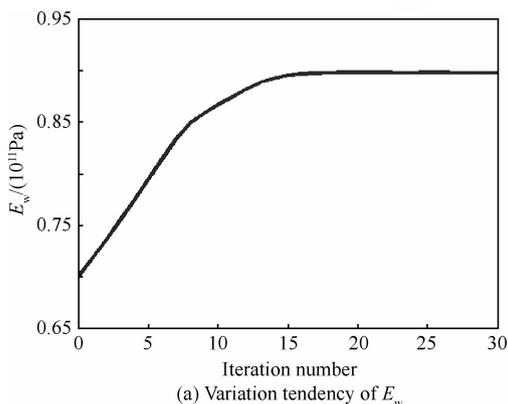
修正研究。修正后的前 10 阶固有频率中, 最大误差为 4.63% , 最小误差为 -0.01% , 平均绝对误差为 1.47% , 达到了文献[8]中提出的误差在 5% 以内的修正精度要求。图 6 和图 7 给出了输入输出参数在迭代修正过程中的变化曲线, 详细显示了各个参数在每一步迭代过程中的变化趋势。

表 4 固有频率的修正结果

Table 4 Updated results of natural frequencies

Mode No.	Test data/Hz	Initial		Updated	
		Frequencies/Hz	Error/%	Frequencies/Hz	Error/%
1	6.55	5.646 5	-13.79	6.278 7	-4.14
2	16.61	14.794 0	-10.93	16.412 1	-1.19
3	34.88	31.322 3	-10.20	34.875 1	-0.01
4	35.36	31.402 0	-11.19	35.079 3	-0.79
5	36.71	36.099 6	-1.66	37.068 4	0.98
6	50.09	46.151 5	-7.86	50.270 0	0.36
7	50.72	48.246 5	-4.88	51.085 1	0.72
8	56.44	53.109 7	-5.90	59.050 7	4.63
9	65.14	60.587 2	-6.99	64.752 3	-0.60
10	69.64	69.746 2	0.15	68.718 5	-1.32
Absolute mean/%			7.36		1.47

Mode No.	Test data/Hz	Initial		Updated	
		Frequencies/Hz	Error/%	Frequencies/Hz	Error/%
11	105.47	101.770 7	-3.51	102.736 0	-2.59
12	134.68	127.137 7	-5.60	128.386 3	-4.67
13	145.87	135.964 7	-6.79	147.614 4	1.20
14	155.82	145.568 3	-6.58	156.146 1	0.21
Absolute mean/%			5.62		2.17



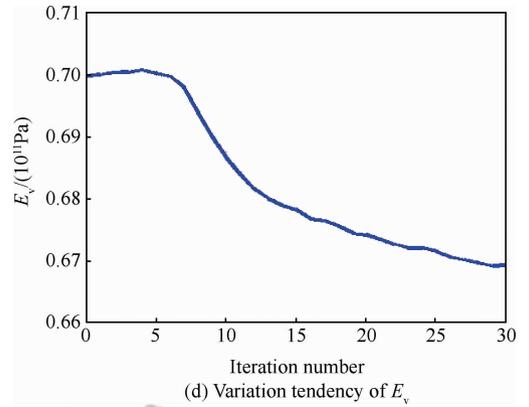
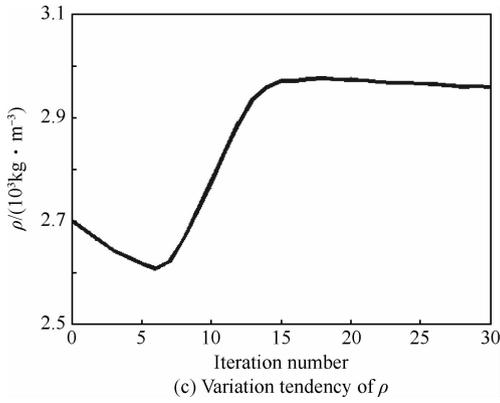


图 6 输入参数的变化曲线

Fig. 6 Variation tendency of the input parameters

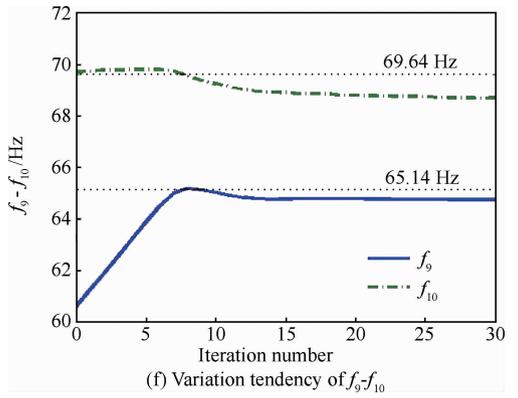
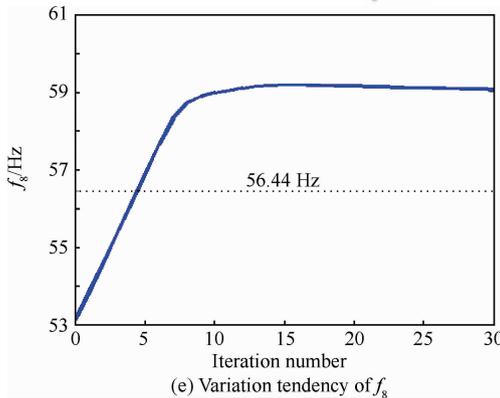
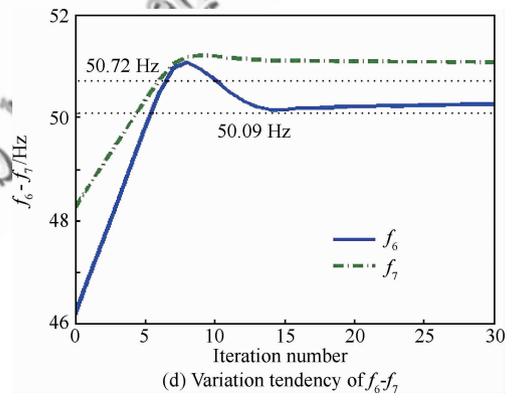
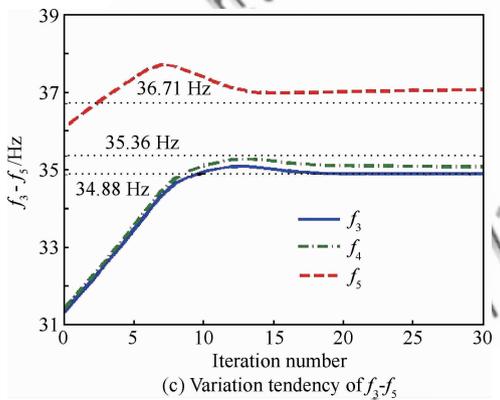
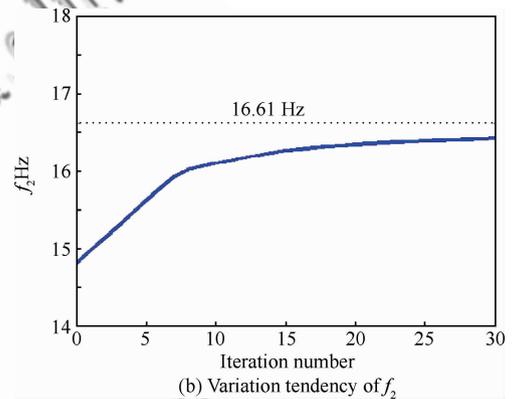
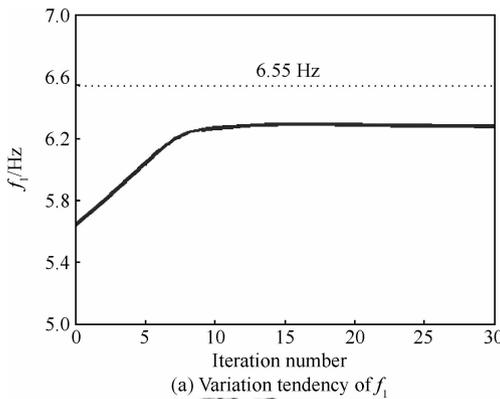


图 7 前 10 阶固有频率的变化曲线

Fig. 7 Variation tendency of the first ten order natural frequency

2.4 评价数据的预测结果分析

用结构后4阶固有频率以及振型作为模型修正的评价数据。表4中还给出了GARTEUR结构的11~14阶固有频率的预测结果。在4个初始频率值中,最大误差为-6.79%,最小误差为-3.51%,平均绝对误差为5.62%;修正后的频率值最大、最小以及平均绝对误差分别为-4.67%,0.21%,2.17%,这表明修正后的有限元模型对于后4阶固有频率达到了可接受的预测精度。

在模型修正的研究中,结构的振型同样应该作为模型有效性的重要衡量标准。对于某些模型修正的局部优化解,即使其频率数据满足

精度要求,但振型往往与试验测量值出现较大偏差^[7]。结构不同振型数据的相似度主要依靠模态置信度(Modal Assurance Criterion, MAC)来衡量。

$$MAC_i = \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i^T \bar{\boldsymbol{\varphi}}_i)^2}{(\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\varphi}_i)(\bar{\boldsymbol{\varphi}}_i^T \bar{\boldsymbol{\varphi}}_i)} \quad (14)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}_i$ 和 $\bar{\boldsymbol{\varphi}}_i$ 分别为第*i*阶振型的仿真值与试验观测值。然而,由于从现有文献中无法得到GARTEUR结构的实测振型数据,图8给出了修正后模型的振型图与文献[11]中实测结构振型图的对比效果。图中显示的第3、4阶以及第6、7阶振型为密集模态,但是有限元模型对这些密集模态的仿真依然比较准确。图8表明有限元模型对振型的预测与试验观测振型基本一致。

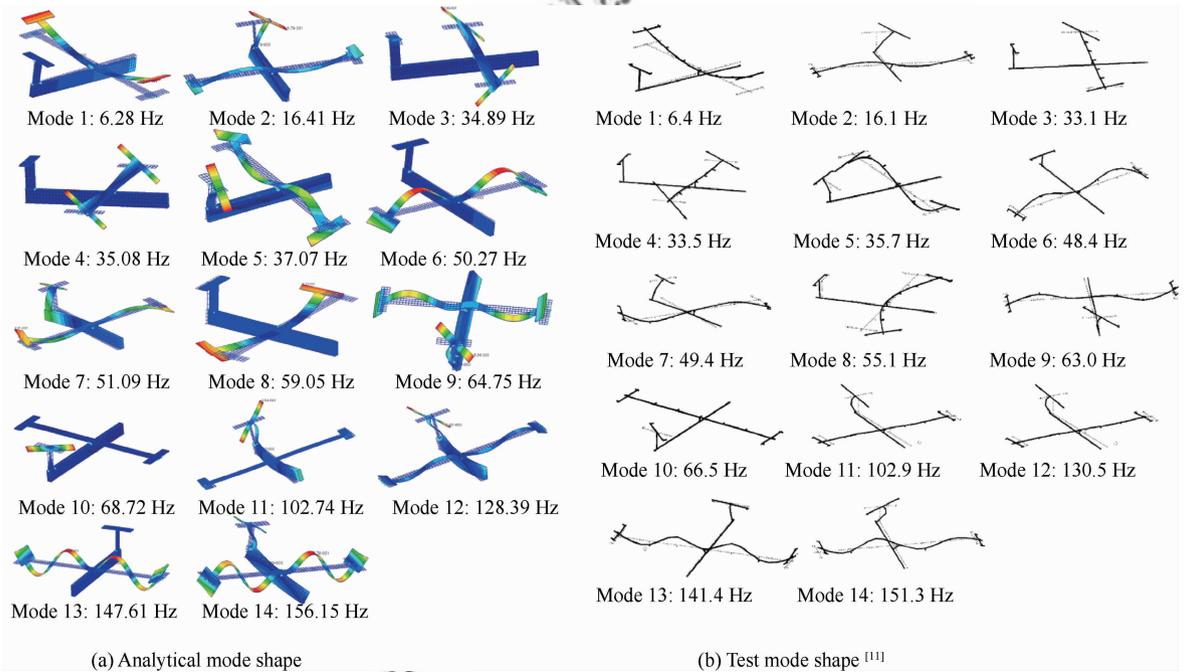


图8 GARTEUR结构的有限元仿真振型与实测振型^[11]对比

Fig. 8 Comparison of analytical mode shape and test mode shape^[11] of the GARTEUR structure

2.5 对结构进行修改后模型的预测结果

为了进一步验证修正后有限元模型的可靠性,英国帝国理工学院的研究人员在GARTEUR飞机尾翼位置增加了0.92 kg的集中质量,并重新测量了修正后结构的固有频率^[11]。针对2.3节修正后的有限元模型,在模型尾翼作同样修改而不过其他额外修正,应该依然能够预示修改

后结构的动力学特性。

表5给出了经过部分调整后的结构试验以及仿真结果。初始模型的最大误差为-13.70%,最小误差为1.69%,平均绝对误差为7.59%。修正后模型的预测误差最大为-4.04%,最小为-0.08%,平均绝对误差为1.13%。结果表明,本文得到的GARTEUR结构有限元模型满足引言中三级确认准则的要求,能够反映实际结构的真实物理特性。

表 5 调整后 GARTEUR 飞机模型的试验以及仿真结果

Table 5 Test and analytical data of the GARTEUR structure with modification

Mode No.	Test data/Hz	Initial		Updated	
		Frequencies/Hz	Error/%	Frequencies/Hz	Error/%
1	6.54	5.644 2	-13.70	6.276 0	-4.04
2	13.94	12.657 9	-9.20	13.765 1	-1.26
3	32.36	30.823 8	-4.75	31.878 8	-1.49
4	35.09	31.391 4	-10.54	35.063 1	-0.08
5	35.52	31.960 1	-10.02	35.199 2	-0.90
6	38.10	38.744 2	1.69	38.049 1	-0.13
7	48.68	46.128 4	-5.24	48.747 8	0.14
8	50.17	46.635 7	-7.04	50.279 3	0.22
9	56.46	53.020 3	-6.09	57.247 7	1.40
10	58.16	53.717 6	-7.64	59.106 1	1.63
Absolute mean/%			7.59		1.13

3 结 论

1) 随机模型修正方法利用模型输入参数的概率分布来描述结构系统的不确定性,并利用 Monte Carlo 法进行随机抽样实验,从而完成不确定由输入到输出的传递分析,这是对传统确定性模型修正方法的发展。

2) 随机抽样实验过程采用径向基函数构造代理模型,只需在前期进行有限元分析,随后的模型修正过程完全利用代理模型,在满足修正精度的同时大大减少了计算量。同时利用 PCL 二次开发工具编制了内嵌于 MCS. Patran 的程序模块,可以自动提交有限元计算并提取分析数据供 MATLAB 进行迭代分析,使得此方法能方便地应用于实际工程问题。

3) 以距离判别分析为核心的参数修正过程,无需计算结构的灵敏度矩阵,不进行梯度运算,对参数初值无要求,对结构的复杂程度不敏感,因此易于推广到强迫振动、爆炸冲击等复杂动力学问题。

参 考 文 献

[1] Mares C, Mottershead J E, Friswell M I. Stochastic model updating: Part 1—theory and simulated example. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(7): 1674-1695.

[2] Zhang L M. Computer simulation & model validation with application to strength and environment engineering. *Structure & Environment Engineering*, 2002, 29(2): 42-47. (in Chinese)
张令弥. 计算仿真与模型确认及在结构环境与强度中的应用. *强度与环境*, 2002, 29(2): 42-47.

[3] Ding J F, Ma X R, Han Z Y, et al. Three-step model updating method in structure dynamics and its application. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(3): 546-552. (in Chinese)
丁继峰, 马兴瑞, 韩增尧, 等. 结构动力学模型修正的三步策略及其实践. *航空学报*, 2010, 31(3): 546-552.

[4] Mottershead J E, Link M, Friswell M I. The sensitivity method in finite element model updating: a tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(7): 2275-2296.

[5] Calvi A. Uncertainty-based loads analysis for spacecraft: finite element model validation and dynamic responses. *Computers & Structures*, 2005, 83(14): 1103-1112.

[6] Xia R W. *Engineering optimization theory and algorithm*. Beijing: Beihang University Press, 2003. (in Chinese)
夏人伟. *工程优化理论与算法*. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

[7] Bi S, Deng Z, Chen Z. Stochastic validation of structural FE-models based on hierarchical cluster analysis and advanced Monte Carlo simulation. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, 67: 22-33.

[8] Doebling S W, Hemez F M, Schultze J F, et al. Overview of structural dynamics model validation activities at Los Alamos National Laboratory. 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materi-

- als Conference, 2002.
- [9] Thomas L, Red-Horse J. Structural dynamics challenge problem: summary. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, 197(29): 2660-2665.
- [10] Zang C, Schwingshackl C W, Ewins D J. Model validation for structural dynamic analysis: an approach to the Sandia structural dynamics challenge. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, 197(30): 2645-2659.
- [11] Link M, Friswell M I. Working Group 1: generation of validated structural dynamic models: results of a benchmark study utilising the GARTEUR SM-AG19 test-bed. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(1): 9-21.
- [12] Szekely G S, Pradlwarter H J, Schueller G I, et al. A detailed scatter analysis of the structural response of spacecraft. *European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Mechanical Testing*, 2001: 605-610.
- [13] Hurtado J E, Barbat A H. Monte Carlo techniques in computational stochastic mechanics. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1998, 5(1): 3-29.
- [14] Mei C L, Zhou J L. *Applied statistical methods*. Beijing: Science Press, 2002: 218-245. (in Chinese)
梅长林, 周家良. *实用统计方法*. 北京: 科学出版社, 2002: 218-245.
- [15] Dou Y F, Liu F, Zhang W H. Research on comparative analysis of response surface methods. *Journal of Engineering Design*, 2007, 14(5): 359-363. (in Chinese)
窦毅芳, 刘飞, 张为华. 响应面建模方法的比较分析. *工程设计学报*, 2007, 14(5): 359-363.
- [16] Ni L. Research on classified validation of complex structure model. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
倪磊. 复杂结构有限元模型分级确认研究. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2009.
- [17] Jiang Y Q. Study on the RBF implicit surface and its application. Chengdu: School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
江永全. 径向基函数隐式曲面的研究及应用. 成都: 西南交通大学信息科学与技术学院, 2011.
- [18] Degener M, Hermes M. Ground vibration test and finite element analysis of the GARTEUR SM-AG19 testbed. DLR Report, IB 232-96 J08, 1996.

作者简介:

毕司峰 男, 博士研究生。主要研究方向: 飞行器结构动力学分析, 结构有限元模型确认。

Tel: 010-82338724

E-mail: sifeng.bi@sa.buaa.edu.cn

邓忠民 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 空间飞行器结构分析与设计, 空间飞行器轨道分析与设计, 计算结构力学。

Tel: 010-82339526

E-mail: dengzhongmin@buaa.edu.cn

Stochastic Model Updating and Validation of the GARTEUR Structure Based on Random Sampling and Distance Discrimination

BI Sifeng, DENG Zhongmin *

School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: A stochastic model updating (SMU) method using distance discrimination analysis and random sampling technique is proposed and subsequently applied to the updating process of the GARTEUR benchmark structure. In contrast to the traditional deterministic model updating procedure in which parameters are calibrated by sensitivity and optimization analysis, the proposed SMU method takes into consideration uncertainties which are general in the modeling as well as test processes. Uncertainty propagation is performed by Monte Carlo sampling method in which a large scale stochastic sampling process is proposed to describe uncertainties from parameters to features. Distance discrimination analysis is presented to quantify the degree of similarity and dissimilarity between analytical and test data. Input parameters are calibrated to the test data through an iterative procedure integrating the above uncertainty propagation and quantification methods. In order to reduce calculation cost, a metamodel is constructed using radial basis function with an acceptable precision. The relative PCL program of MSC. Patran is employed to submit multiple finite element (FE) analyses and to extract information for subsequent analysis. An application is performed on the GARTEUR structure and the updating results are assessed by the widely accepted 3-steps validation criteria. The updating and validation results show the proposed SMU method is valid and effective in engineering application.

Key words: model updating; model validation; uncertainty; Monte Carlo method; distance discrimination analysis; GARTEUR

Received: 2013-03-22; **Revised:** 2013-04-23; **Accepted:** 2013-06-17; **Published online:** 2013-07-15 10:12

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130715.1012.002.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (10972019); Innovation Foundation of BUAA for PhD Graduates

* **Corresponding author.** Tel.: 010-82339526 E-mail: dengzhongmin@buaa.edu.cn