

参数化有限元建模及模型修正

王森,史治宇

(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)

摘 要:初始有限元模型的准确程度对模型修正的准确度以及最后的成败都极为关键。为了得到与实际结构相近的准确初始有限元模型,提出了完全参数化建模的概念,针对 GARTEUR 飞机模型创建模型修正算例,验证了完全参数化建模对模型修正的有效性。利用试验数据修正尽可能完全参数化的 GARTEUR 有限元模型来说明完全参数化建模的实际工程意义。结果表明,采用完全参数化建模可以得到准确的初始有限元模型。

关键词:模型修正;完全参数化建模;GARTEUR 飞机

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0110-03

Parametric Finite Element Modeling and Model Updating

WANG Sen, SHI Zhiyu

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

Abstract: The accuracy of the model updating and the final success or failure depend on the accuracy of the initial finite element model. To obtain an accurate initial finite element model similar to the actual structure, the concept of fully parametric modeling is proposed in this paper, then, a model updating example is created for GARTEUR aircraft model, and the validity of the fully parameterized model for the model updating is verified, the GARTEUR finite element model which is fully parameterized as far as possible is updated with experimental data, which is used to illustrate the practical engineering significance of fully parametric modeling. The results show that the accurate initial finite element model can be obtained by using the fully parameterized model.

Keywords: model updating; fully parametric modeling; GARTEUR aircraft

0 引言

有限元模型修正的目的是使有限元模型能够更为准确地描述实际结构,使之能更加正确地预测结构在各种载荷激励下的响应^[1]。模型修正技术经过 30 多年的发展,已经取得了很大的进步,且在工程中得到了应用。SCHIEDLINSKI C^[2]利用实验测得的模态对某发动机主要部件初始有限元模型进行了修正;ZHANG Q W 等^[3]修正了缩比的桥梁模型。

在有限元建模过程中由于众多的不确定性因素以及引入了多种假设,使得有限元模型必然存在误差,从而使有限元分析结果不可能完全真实地反映结构特性。为了尽可能减小误差,本文提出了完全参数化建模的概念,并通过 GARTEUR 飞机模型的仿真算例和试验算例验证了完全参数化建模对模型修正的有效性^[4]。

1 GARTEUR 飞机模型修正算例

1.1 模型修正方法

假设结构的有限元模型总共有 n 个设计参数,其中前

m 个为待修正的参数,则设计参数可以表示为:

$$\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_m, \dots, p_n]^T \quad (1)$$

对应的特征量可以表示为设计参数 p 的函数:

$$f = F(K, M) = F[f_k(p), f_m(p)] = f(p) \quad (2)$$

其中 f 可以是结构任意的特征量。模型修正问题转化为如下优化问题^[5]:

$$\begin{aligned} \text{Min } \|R(p)\|^2, R(p) = \{f_e(p)\} - \{f_a(p)\} \\ \text{s.t. } \underline{p} \leq p \leq \bar{p} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\{f_e(p)\}$ 和 $\{f_a(p)\}$ 分别代表结构动态特性的试验值与分析值; $R(p)$ 为残差项; $\underline{p}$ 、 $\bar{p}$ 分别为结构设计参数的下限和上限。

利用拉格朗日乘子法,将式(3)的极值问题转化为如下的线性问题:

$$S\Delta p = f_e(p) - f_a(p_0) \quad (4)$$

公式(4)便是常见的模型修正方程。

建立真实结构的有限元模型时,如果有限元模型与真实结构的误差能够完全由建模参数反映出来,则称这样的有限元模型为完全参数化模型。如果有限元模型与真实结构的误差不能完全由建模参数反映出来,称之为非完全

参数化模型。

1.2 GARTEUR 飞机模型仿真算例

1) 模型介绍

GARTEUR 飞机模型是具有 12 个成员的欧洲航空科技研究组织建立的一个典型的标准飞机模型,如图 1 所示。该模型具有真实飞机高柔度、模态频率低且密集的特点,宽 2.0 m,长 1.5 m,由硬质铝材通过螺栓连接而成。

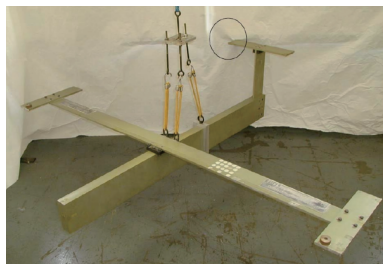


图 1 GARTEUR 飞机模型

2) 完全参数化模型的修正算例

利用有限元软件 Hypermesh 建立 GARTEUR 飞机的目标有限元模型作为试验模型,如图 2 所示。该模型共有 996 个节点;4 888 个自由度;861 个单元,包括 17 个梁单元,36 个弹簧单元,778 个壳单元;4 种材料属性。图 2 中 1、2、3 处分别采用弹簧单元和刚性单元模拟飞机模型的螺栓连接处。

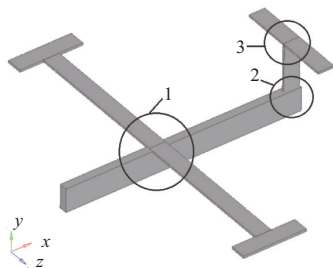


图 2 GARTEUR 飞机有限元模型

GARTEUR 飞机模型误差主要体现在结构连接处、铝合金板的弹性模量和密度。在目标有限元模型的基础上将模型结构连接处和附近部位的 5 个设计参数及 6 个材料参数进行摄动作为完全参数化初始有限元模型,用于仿真分析,如表 1 所示。表 1、表 3、表 5、表 7 中的编号具有一致性。摄动的参数中扭转刚度(编号 1-编号 5)的单位为 $\text{N} \cdot \text{mm} / \text{rad}$;弹性模量(编号 6-编号 8)的单位为 MPa ;材料密度(编号 9-编号 11)的单位为 kg / mm^3 。

表 1 摄动参数的目标值和摄动值

编号	设计参数	目标值	摄动值
1	机翼绕 x 轴扭转刚度	6.00×10^5	7.50×10^5
2	垂尾绕 x 轴扭转刚度	9.50×10^5	1.10×10^6
3	垂尾绕 z 轴扭转刚度	1.25×10^6	1.00×10^6
4	平尾绕 x 轴扭转刚度	8.80×10^5	7.00×10^5
5	平尾绕 y 轴扭转刚度	1.35×10^6	1.15×10^6
6	机翼材料弹性模量	7.20×10^4	7.00×10^4

续表 1

编号	设计参数	目标值	摄动值
7	垂尾材料弹性模量	7.50×10^4	7.00×10^4
8	平尾材料弹性模量	7.40×10^4	7.00×10^4
9	机翼材料密度	2.75×10^{-9}	2.60×10^{-9}
10	垂尾材料密度	2.80×10^{-9}	2.60×10^{-9}
11	平尾材料密度	2.65×10^{-9}	2.60×10^{-9}

选取进行摄动的 11 个参数进行灵敏度分析,如图 3 所示。从图 3 中可以看出编号为 3、5、10 的参数灵敏度都很低,选取这些参数可能会增大有限元模型的误差,故最终选取除编号 3、5、10 之外的 8 个参数作为修正参数进行模型修正。

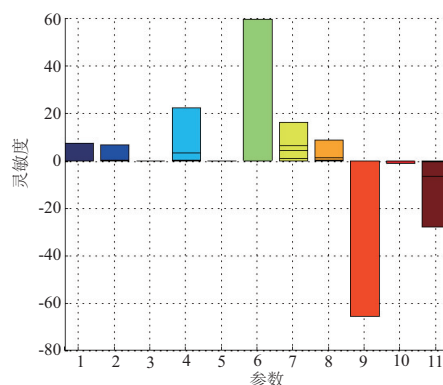


图 3 前 14 阶频率对 11 个参数的灵敏度

完全参数化模型修正结果,如表 2、表 3 所示。

表 2 模型修正结果

阶次	目标值/Hz	初始值/Hz	修正值/Hz	修正后误差/%
1	5.01	5.31	5.01	0.00
2	11.08	11.61	11.08	0.00
3	30.65	30.81	30.65	0.00
4	39.51	38.78	39.49	-0.05
5	41.24	41.69	41.25	0.02
6	42.81	42.42	42.85	0.09

表 3 修正参数的修正结果

编号	目标值	修正值	修正后误差/%
1	6.00×10^5	6.14×10^5	2.33
2	9.50×10^5	9.31×10^5	-2.00
4	8.80×10^5	9.13×10^5	3.75
6	7.20×10^4	7.55×10^4	4.86
7	7.50×10^4	7.72×10^4	2.93
8	7.40×10^4	7.68×10^4	3.78
9	2.75×10^{-9}	2.82×10^{-9}	2.55
11	2.65×10^{-9}	2.71×10^{-9}	2.26

由表2、表3可以看出,模型修正之后前6阶修正频率平均误差为0.02%,最大误差为0.09%,对应的参数修正后平均误差为2.22%,最大误差为4.86%。

当有限元模型为完全参数化模型时,修正后的结果非常精确,修正后的模型几乎和真实结构一样。

3) 非完全参数化模型的修正算例

仍以前文中的目标有限元模型作为试验模型,分别以缺失灵敏度较大的平尾绕 x 轴扭转刚度和缺失灵敏度较小的垂尾绕 z 轴扭转刚度以及平尾绕 y 轴扭转刚度两种情况的非完全参数化模型作为初始有限元模型,进行模型修正。

情况一:缺失平尾绕 x 轴扭转刚度的非完全参数化模型的修正结果,如表4、表5所示。

表4 情况一模型修正结果

阶次	目标值/Hz	初始值/Hz	修正值/Hz	修正后误差/%
1	5.01	5.31	5.01	0
2	11.08	11.69	11.08	0
3	30.65	31.61	30.66	0
4	39.51	39.07	39.60	0.03
5	41.24	42.43	41.13	0.02
6	42.81	43.42	42.99	0.27

表5 情况一修正参数的修正结果

编号	目标值	修正值	修正后误差/%
1	6.00×10^5	6.06×10^5	1.06
2	9.50×10^5	9.46×10^5	-0.45
6	7.20×10^4	7.13×10^4	-1.00
7	7.50×10^4	7.81×10^4	7.00
8	7.40×10^4	1.43×10^4	-80.71
9	2.75×10^{-9}	2.70×10^{-9}	-1.82
11	2.65×10^{-9}	2.69×10^{-9}	1.89

从表4、表5可以看出,修正之后前6阶频率平均误差为0.12%,最大误差为0.27%,对应的参数误差平均为13%,最大误差为80.71%。平尾材料弹性模量这一参数超出误差范围,与实际不符。即使修正后有限元模型能以较高的精度复现前6阶模态频率,也不能保证预测更高阶的频率,不具有实际意义。

情况二:缺失垂尾绕 z 轴扭转刚度和平尾绕 y 轴扭转刚度的非完全参数化模型的修正结果,如表6、表7所示。

表6 情况二模型修正结果

阶次	目标值/Hz	初始值/Hz	修正值/Hz	修正后误差/%
1	5.01	5.31	5.02	0.20
2	11.08	11.61	11.08	0
3	30.65	30.81	30.65	0
4	39.51	38.78	39.52	0.03
5	41.24	41.69	40.95	-0.70
6	42.81	42.42	42.61	-0.47

表7 情况二修正参数的修正结果

编号	目标值	修正值	修正后误差/%
1	6.00×10^5	6.07×10^5	1.19
2	9.50×10^5	1.02×10^6	7.81
4	8.80×10^5	9.46×10^5	7.45
6	7.20×10^4	6.99×10^4	-2.78
7	7.50×10^4	7.94×10^4	5.88
9	2.75×10^{-9}	2.68×10^{-9}	-2.55
11	2.65×10^{-9}	2.78×10^{-9}	4.90

从表6、表7可以看出,修正之后前6阶频率平均误差为0.23%,最大误差为0.70%,对应的参数误差平均为4.56%,最大误差为7.81%。修正结果较好,修正后的有限元模型更加接近于真实结构。

如果非完全参数化模型缺失的一些参数对目标函数的灵敏度较小,那么缺少这些参数的初始有限元模型经过模型修正后仍能得到比较精确的修正有限元模型。如果这些参数对目标函数灵敏度较大,它们数值的改变会对结构的动力学特性产生很大的影响,那么缺少这些参数的初始有限元模型修正时不仅增加了迭代次数,而且修正后不会得到精确的结果,甚至产生更大的误差。

1.3 利用 GARTEUR 飞机实测数据的修正

根据 GARTEUR 飞机振动模态试验测试结果,对图4所示的尽可能完全参数化的 GARTEUR 飞机有限元模型进行模型修正。考虑到 GARTEUR 飞机模型中结构连接处的刚度不容易准确模拟,选择机翼 x 向扭转刚度、平尾 x 向扭转刚度、垂尾 x 向扭转刚度、垂尾 y 向扭转刚度作为待修正参数。经过25次迭代后,修正结果收敛,如表8所示。

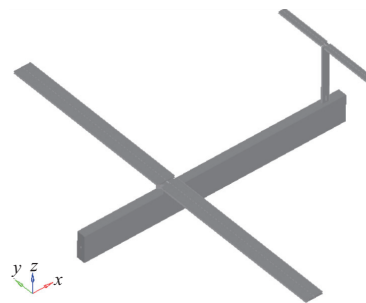


图4 尽可能完全参数化的 GARTEUR 有限元模型

表8 模型修正结果

阶次	目标值/Hz	初始值/Hz	修正值/Hz	修正后误差/%
1	6.87	6.59	6.88	0.17
2	11.26	11.21	11.28	0.19
3	21.44	19.70	21.44	0
4	26.62	26.02	26.43	-0.70
5	29.59	29.59	29.59	0.01
6	42.50	39.72	42.49	-0.01

(下转第141页)

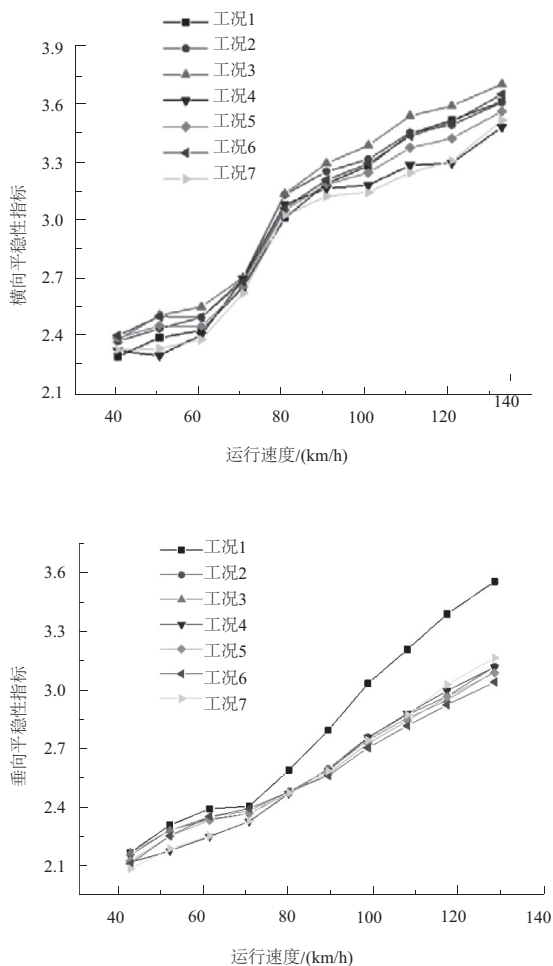


图7 磨损状态下平稳性指标计算结果(后车)

4 结语

基于多体系统动力学理论,建立了公铁联运多功能运输车两节车组仿真模型,对该车组进行了动力学性能仿真。由计算结果可知,在新车和车轮磨损状态下,空车、重车不同装载工况的临界速度均 $>132\text{ km/h}$,能够满足空车、重车不同装载工况车辆 120 km/h 设计速度的要求,并具有一定的速度裕量;曲线通过安全性各指标均满足标准规定的安全限度要求,车辆可以在曲线和直线上安全运行;空车、重车不同装载工况的运行平稳性指标满足GB/T 5599-1985的良级标准要求,能保证空车、重车不同装载工况车辆在 120 km/h 设计速度范围内平稳运行。

参考文献:

- [1] 吴荣坤,李华,于跃斌,等. 我国发展驮背运输技术的思考[J]. 铁道车辆,2016,54(11): 4,9-12.
- [2] 吴荣坤,李华,郑和平,等. QT₁(2)型驮背运输车研制[J]. 铁道车辆,2019(9): 4-5,25-27.
- [3] 石海龙,李拓. 铁路发展多式联运和货物快捷运输技术国内外发展情况浅析[J]. 技术与市场,2017,24(8): 102-103.
- [4] HE Yinchuan,ZHANG Qingping,LIN Wu,et al. Simulation analysis of the affect of running speed on the piggyback-transportation safety[J]. Springer International Publishing,2018(5): 347-354.
- [5] 罗仁,石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2018: 57-82.
- [6] 王勇,曾京,鄧平波. 两联关节式集装箱平车动力学仿真模型[J]. 交通运输工程学报,2008(1): 1-4.
- [7] 刘闯. 30 t轴重货车动力学性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

收稿日期:2019-11-11

(上接第112页)

由表8可以看出,作为目标值的前6阶频率平均误差为0.18%,最大误差为0.70%,精度非常高。

2 结语

本文给出了完全参数化建模的定义,并通过GARTEUR飞机仿真算例和试验算例对完全参数化建模的有效性进行了验证,得到结论如下。

1) 采用完全参数化思想建立的GARTEUR飞机模型修正后能够以较高的精度复现修正频段内的模态频率,并对修正频段外的频率准确地进行预示,验证了完全参数化建模的有效性。

2) 对于非完全参数化模型相比于完全参数化模型所缺失的是能反映结构误差的参数,若灵敏度低,则对模型修正影响不大,修正后仍能得到较为精确的有限元模型;若灵敏度高,则可能对模型修正造成很大的影响,不仅增加了迭代次数,而且修正后不会得到精确的结果,甚至产生更大的误差。

3) 建立初始有限元模型时,只有全面且准确地定位

误差,采取正确的参数模拟,严格控制其取值范围,才能得到准确的初始有限元模型并在修正后得出质量较高的修正结果。

参考文献:

- [1] 张权,史治宇. 加权方法在基于灵敏度分析的模型修正中的应用[J]. 机械制造与自动化,2018,47(6): 85-88.
- [2] SCHEDLINSKI C. Computational model updating of large scale finite element models. proceedings of IMAC 2000, San Antonio, USA.
- [3] ZHANG Q W, CHANG C C, CHANG T Y P. Finite element model updating for structures with parametric constraints[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(7): 927-944.
- [4] LINK M,FRISWELL M. Working group 1: generation of validated structural dynamic models-results GARIEUR SM-AG19 test-bed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing. 2003, 17(1): 9-20.
- [5] 秦仙蓉. 基于灵敏度分析的结构计算模型修正技术及相关问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2001.

收稿日期:2019-10-10