

风洞模型支撑机构有限元模型修正与确认

麻越垠¹, 郝鹏², 马斌¹, 陈万华¹

- (1. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000;
2. 大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 风洞模型支撑机构有限元建模对预测风洞试验中的结构动力学响应至关重要。然而采用模态试验修正有限元模型需要多轮迭代优化, 随着修正参数的增多, 数值优化耗时将呈指数化增长。为解决上述问题, 联合 ABAQUS、MATLAB 搭建 iSIGHT 结构有限元模型修正平台, 基于此平台开展某模型支撑机构有限元动力学模型修正, 根据试验设计变量对响应的贡献量, 筛选灵敏度较高的修正变量; 构建前 4 阶频率差和振型相关性为多目标函数, 使用近似建模得到修正变量和目标函数的响应面模型, 采用多目标优化方法 NSGA-II 开展模型修正; 修正后的模型前 4 阶频率差均在 10% 以内, 振型相关性均大于 0.8。对修正模型开展动力学响应确认, 使用结构模态动力学响应与锤击试验响应作对比, 结果显示, 修正模型满足工程需求, 可用作下一步复杂载荷作用下的结构动力学响应预测。

关键词: 有限元模型修正; 近似建模; 多目标优化; 模型支撑机构; 模型确认

中图分类号: TD402 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2021) 05-0051-09

Finite Element Model Updating and Validating for Model Support Mechanism of Wind Tunnel

MA Yueyin¹, HAO Peng², MA Bin¹, CHEN Wanhua¹

- (1. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Accurate finite element model of wind tunnel model support mechanism is important to predict the dynamic response of the model in wind tunnel test. With the increase of the modified parameters, the time consumption of numerical optimization will increase exponentially. In order to solve this problem, the computer-aided optimization software iSIGHT, ABAQUS and MATLAB are used to establish a platform of the structural finite element model updating, which can automatically integrate the flow of components. Based on this platform, the finite element dynamic model updating of a model support system is carried out, and the updating variables are selected according to the contribution of the variables to the response; the first four mode frequency differences and mode shape correlations are constructed as multi-objective functions, and the response surface models of the updating variables and objective functions are obtained by using approximate modeling method, and the model updating is conducted by using a variety of multi-objective optimization methods; the first four updated mode frequency differences are less than 10%, and the correlations of the mode shapes are greater than 0.8. The results show that the updated

收稿日期: 2021-01-15; 修订日期: 2021-09-07

基金项目: 中国空气动力研究与发展中心基础与前沿技术研究基金 (PJD20200224)

作者简介: 麻越垠 (1987-), 男, 工程师, 主要研究方向为风洞设备力学特性分析与优化。E-mail: mayueyin@cardc.cn

model meets the engineering requirements and can be used to predict the dynamic response of the structure under the complex load condition.

Key words: Finite element model updating; Approximate modeling; Multi-objective optimization; Model support system; Model validating

0 引言

在工程设计领域,随着数值模拟技术的快速发展和计算机运算能力的不断提升,基于高可信度数值模拟的设计方法已经开始发挥越来越重要的作用^[1-3]。有限单元法是工程分析应用最为广泛的数值方法^[4-5],有限元模拟分析目前已经成为与理论分析、试验研究鼎足而立的重要科学研究手段之一^[6]。为减小有限元模型参数误差,使有限元模型更可靠的反应实际结构特性,需应用理论数据或试验数据对有限元模型实施修正^[7-9],减小数值计算结果和试验测试结果之间的偏差^[10-12]。结构有限元修正问题可转化为参数优化问题,即对目标函数求极值^[13]。使用优化方法最主要的一个障碍就是所采用的数值模拟耗时太长,实际工程问题往往需要多轮迭代优化,若每一次迭代都调用一次数值模拟,将非常耗时甚至不可行^[14-15]。近似建模技术是通过数学模型的方法逼近一组输入变量与输出变量的方法,避免优化设计中频繁调用仿真程序^[16]。20世纪80年代,波音777的GE90涡扇发动机设计项目中,不同专业的工程师通过手工“试算-评估-校正”方法进行发动机优化设计,耗时巨大且优化效果不明显。为解决此类多学科优化问题,计算机辅助优化平台iSIGHT由此诞生,具有自编程集成接口,融合多种优化探索策略,设计仿真流程集成自动化,有效提升优化效率。吴思远等^[17]提出基于iSIGHT-MSCPatran/Nastran联合仿真与特征灵敏度优化相结合的快速建模方法,完成弧形闸门动力模型修正。吴建云等^[18]利用ADAMS和iSIGHT软件联合仿真,采用优化拉丁方试验设计缩小修正参数范围,采用自适应模拟退火算法进行模型参数修正,修正后的仿真模型更符合实际试验样机。李杰等^[19]基于iSIGHT联合仿真的方案,采用最优拉丁超立方试验设计对重型汽车平顺性进行了灵敏度分析。李永洲等^[20]利用iSIGHT软件对反正切马赫数分布可控的轴对称基准流场设计参数进行灵敏度分析。

本文根据参数型有限元模型修正一般流程,联合ABAQUS、MATLAB搭建iSIGHT结构有限元模型修正平台,开展某模型支撑机构动力学模型修正,以试验设计变量对响应的贡献量为依据,筛选修正变量,构建前4阶频率差和振型相关性为目标函数,使用近似建模得到修正变量和目标函数的响应面模型,采用多目标优化方法非劣排序遗传算法NSGA-II完成风洞模型支撑机构有限元模型多目标修正;并对修正后的有限元模型开展动力学响应确认,计算锤击激励下的结构模态动力学响应,与锤击试验响应作对比,结果显示,修正后的模型满足工程需求。

1 多目标有限元模型修正

模型修正方法有矩阵型法和参数型法两大类^[21]。矩阵型法是最早发展一类模型修正方法,起初是根据飞机地面共振试验数据修改结构柔度矩阵,用直接求解的方法,计算效率很高;缺点是修正目标的物理意义不明确,操作困难。参数型法是以工程师建模时所使用的的设计参数为修正对象,包括物理参数、几何参数、边界条件和连接刚度等^[22],结果易于解释,便于工程判断,与CAE软件配合,可以实现参数优化设计,是目前模型修正主要发展方向。图1为参数型有限元模型修正一般流程,由有限元初始模型得到结构动力学计算结果,与动力学试验结果开展相关性分析;对潜在的待修正参数进行灵敏度分析,选择修正参数;以结构动力学特性构建目标函数,开展优化设计,也可以通过试验设计等手段构建修正变量的样本空间,建立目标函数的近似模型,根据近似模型直接开展数值优化,最终输出修正后的参数。采用修正后的有限元模型,来研究其在其他设计工况下的动力学行为。

工程问题中的优化设计存在数值模拟耗费时间过长的的问题,近似模型方法是通过数学模型的方法逼近一组输入变量与输出变量的方法^[23-25],通过显式函数来表达结构参数和响应值之间的隐式关系,从而获得结构的近似模型(也称之为代

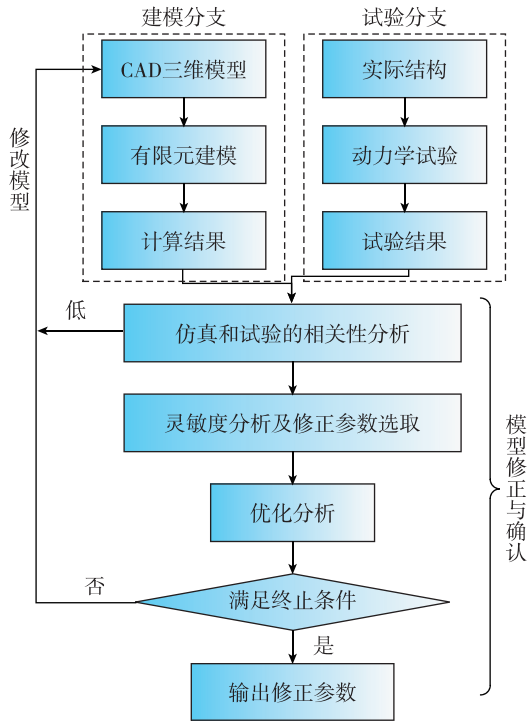


图 1 参数型有限元模型修正流程

Fig. 1 Procedure of parametric FEA model updating

理模型)；在近似模型基础上进行的迭代计算，完全属于数学的运算过程，可以明显提高计算效率，减少数值迭代计算的次数。响应面模型是一种常用的近似建模方法，假设待修改的结构参数 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 与有限元模型计算所得的结构性能指标 y (位移、应力、频率、振型等) 的关系为

$$y = f(x_i) + \epsilon \quad (1)$$

式中， $f(x_i)$ 是 x_i 区域上的一个曲面的响应函数； ϵ 为随机误差；实际问题中， f 是隐式的，通常采用多项式或其他响应面模型近似描述 f ，2 阶多项式是最常见的响应面模型，其形式为

$$y(x) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_i + \sum_{i < j}^N a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N a_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (2)$$

式中，待定系数 a_i 表示变量 x_i 的线性效应；当 $i \neq j$ 时， a_{ij} 表示 x_i 和 x_j 的交互作用效应；当 $i = j$ 时， a_{ii} 表示变量 x_i 的二次效应。

有限元动力学模型修正的优化目标函数通常同时包括频率信息和振型相关性信息，使用固有频率和振型相关性修正目标函数为

$$f_{e,i} = \frac{|f_{s,i} - f_{r,i}|}{f_{r,i}} \quad (3)$$

$$MAC_i = \frac{(\{\Psi\}_{r,i}^{*T} \{\Psi\}_{s,i})^2}{(\{\Psi\}_{r,i}^{*T} \{\Psi\}_{r,i})(\{\Psi\}_{s,i}^{*T} \{\Psi\}_{s,i})} \quad (4)$$

式中， $f_{e,i}$ 为第 i 阶试验频率和计算频率的误差百分比， MAC_i 为第 i 阶试验振型和计算振型的相关值， $f_{r,i}$ 和 $\{\Psi\}_{r,i}$ 为第 i 阶试验模态频率和振型， $f_{s,i}$ 和 $\{\Psi\}_{s,i}$ 为第 i 阶计算态频率和振型。

2 模态试验

模型支撑机构是风洞试验中固定和调节模型姿态的机构，其动态特性决定风洞试验数据精度。图 2 为模型支撑机构三维模型，机构主要由框架、弯刀支板、支杆、直线导轨系统、圆弧导轨系统、丝杠系统和侧向压轮系统组成。弯刀支板和支杆是整个机构实现所有功能的结构载体，丝杠系统在模型支撑机构运动中起传动作用，圆弧导轨系统起导向作用，侧向压轮系统包括固定压轮组件和弹性压轮组件，固定压轮组件通过螺钉调节弯刀支板的位置，另一侧的弹性压轮组件通过碟簧施加作用在弯刀支板上的顶紧力。结构整体安装在框架上，框架与地面采用地脚螺栓固定。

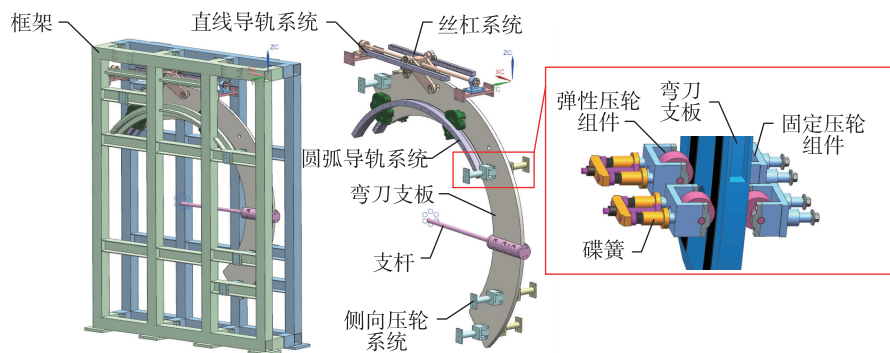


图 2 风洞模型支撑机构三维模型

Fig. 2 The 3D wind tunnel model of support mechanism

通过试验模态确定结构的动力学特性,包括模态频率、模态振型、模态阻尼比等参数,为结构有限元模型修正提供依据。图3为模态试验对象和试验测点布置结果,共有55个三向测点,规定竖直方向为Z向,弯刀支板法向为Y向,X向根据右手坐标系确定。

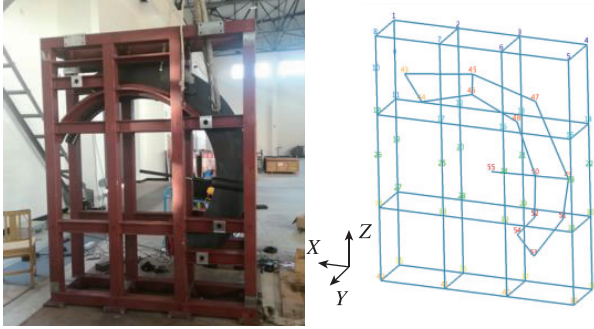


图3 模态试验测点布置

Fig. 3 Layout of test points for modal test

采用移动力锤法、多个参考点进行测试,测得前4阶(40 Hz以内)的试验模态频率分别为8.6, 21.2, 23.5, 39.2 Hz。对应的模态振型如图4所示,1阶振型为Y向摆动,2阶振型为绕Z轴扭转,3阶振型为X向摆动,4阶振型为支杆Y向摆动。

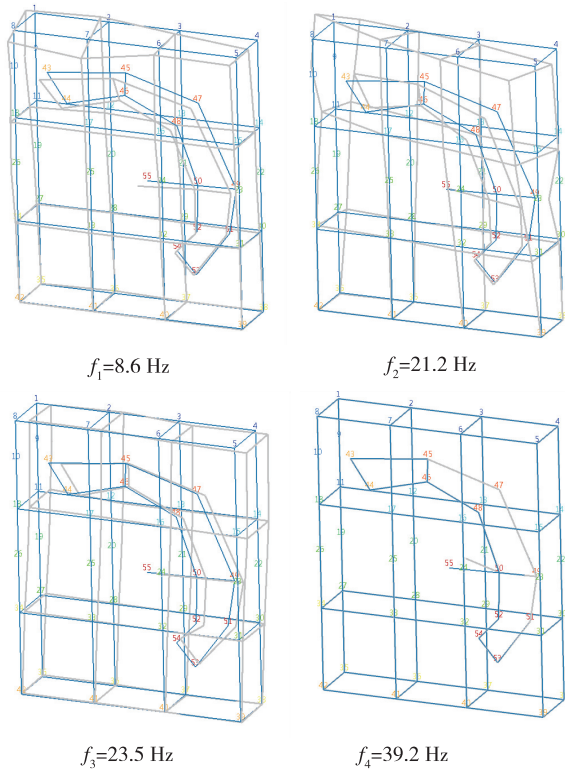


图4 模态试验结果

Fig. 4 Results of modal test

使用模态置信准则MAC评估前4阶模态振型的相关性,如图5所示。各试验模态阵型互相关值均较小,最大0.025,远小于工程允许值0.2,说明试验振型正交性较好,满足修正需要。

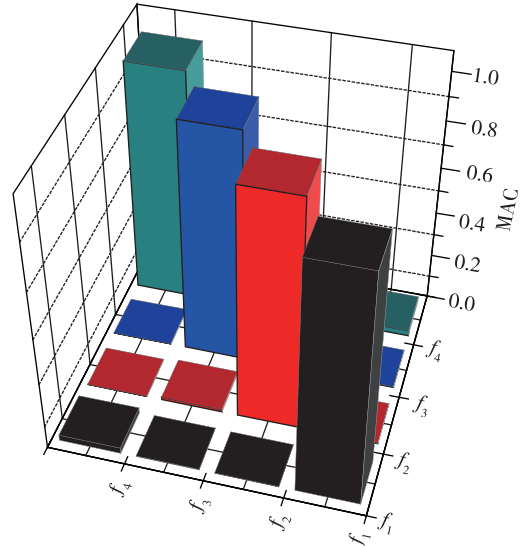


图5 试验模态振型相关性

Fig. 5 Correlation of test mode shapes

3 模态分析与匹配

采用ABAQUS开展模型支撑机构动力学仿真分析,对结构设计三维模型做出如下简化:

- 1) 底板上的螺栓孔去除,设为固定连接;
- 2) 轴承连接简化为铰链连接;
- 3) 丝杠系统、直线导轨系统和圆弧导轨系统均只考虑其功能自由度,丝杠系统、直线导轨系统简化为直线连接,圆弧导轨系统简化为转动连接;
- 4) 侧向压轮系统的固定压轮组件与弯刀支板简化为平面滑动,弹性压轮组件与弯刀支板简化为考虑弹性的轴向连接;
- 5) 所有部件均为钢制结构,采用统一材料属性,不考虑材料差异性。

求解40 Hz以下的模态,模态分析结果如图6所示,40 Hz以内共有4阶模态信息,计算模态频率分别为11.5, 24.7, 31.0和36.4 Hz。

将初始模型计算模态与试验模态进行匹配,表1为试验模态和计算模态匹配结果,前4阶振型相关性均在0.8以上,达到良好水平;频率差分别为34.12%、16.36%、31.86%和7.08%,本项目要求的误差率不大于10%,且振型相关性(MAC)

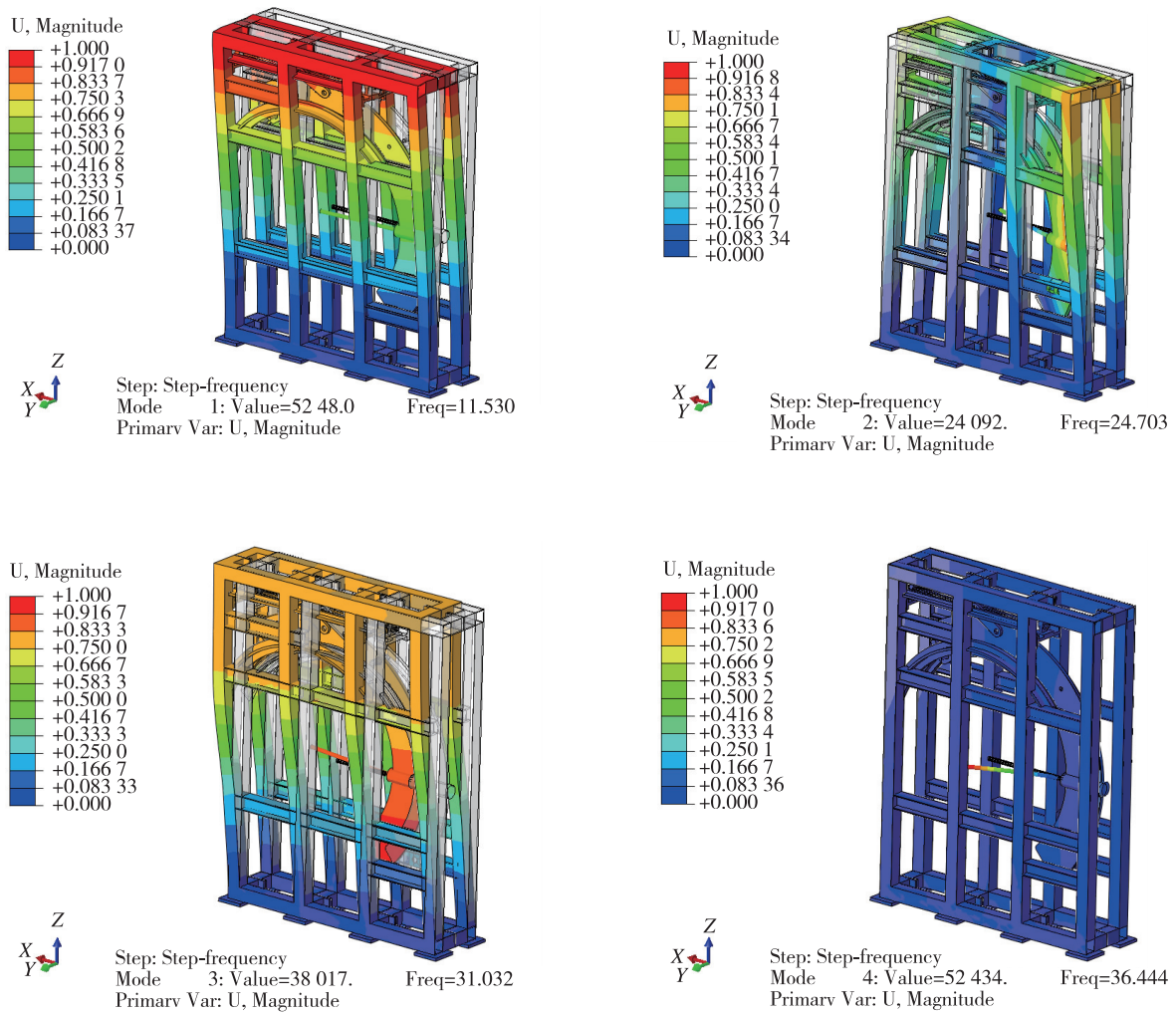


图 6 初始模态分析结果

Fig. 6 Result of modal analysis

不小于 0.8，因此，有限元动力学模型不满足项目要求，需要开展模型修正。

表 1 试验模态和计算模态匹配

Tab. 1 Mode matching of test and simulation

阶数	f_r /Hz	f_s /Hz	f_e	MAC
1	8.6	11.5	34.12%	0.90
2	21.2	24.7	16.36%	0.83
3	23.5	31.0	31.86%	0.83
4	39.2	36.4	7.08%	0.80

4 有限元模型修正与确认

由表 1 可知，初始计算模态与试验模态振型相关性较好，说明模型整体边界设置相对合理，修正变量应为内部部件的材料属性和连接刚度。初

步选择前、后框架和弯刀支板的材料属性以及弹性压轮组件中的碟簧刚度，材料属性包括密度和弹性模量。

在分析时忽略地板、轴承等小零件和动力部件，如电机、丝杠螺母机构、导轨滑块机构等，导致结构整体质量减小，表现为按照标准钢材选择的材料密度可能偏小；同时，对螺栓、弹簧、轴承的简化，也导致部件刚度发生改变，表现为材料弹性模量的变化。根据工程经验，设置修正变量水平变化范围为基准值 $\pm 20\%$ 。

表 2 为修正变量的代表符号、初始值和水平范围，共 7 个变量，根据计算简化的不同，各个变量对结果的影响度也不同，因此对变量进行灵敏度分析，筛选对修正目标影响较大的变量，减少修正变量个数，提升优化效率。

目标之间一般是互相冲突的,需要进行多目标的比较、权衡和折中,使各子目标均尽可能达到最优,最优解的集合定义为 Pareto 解集。一个具有 n 个变量, m 个目标函数的多目标优化问题可表达为

$$\begin{aligned} \min \quad & y = F(f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x),) \\ \text{s. t.} \quad & g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, q \\ & h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, p \\ & x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \subset \mathbf{R}^n \\ & y = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \in Y \subset \mathbf{R}^m \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \subset \mathbf{R}^n$ 为变量, $y = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \in Y \subset \mathbf{R}^m$ 为目标函数, X 和 Y 分别为 n 和 m 维目标空间, $g_i(x)$ 为 q 个不等式约束, $h_j(x)$ 为 p 个等式约束。对于给定的两个点 $x, x^* \in X_f$ (X_f 为可行解集合), 仅当:

条件 1: $f_i(x) \leq f_i(x^*) (i = 1, 2, \dots, m)$

条件 2: 至少一个目标函数 $f_j(x) < f_j(x^*)$

条件 1 和条件 2 同时满足, 则认为 x 支配 x^* , 表达为 $x \succ x^*$, 其中为 x 非支配解, 为 x^* 支配解, 非支配解集即为全局最优解集, 记为 Pareto 解集, 其在目标空间的映射, 表示为 Pareto 前沿。求解 Pareto 解集有两种方法:

1) 选择适当的权重系数, 将多目标优化转化为单目标优化。更改权重系数, 再次优化。

2) 基于种群的搜索, 同时评估一系列设计方案, 最常用的方法是非劣排序遗传算法 NSGA-II。

NSGA-II 使用遗传算法进行搜索, 具有全局寻优的特点^[26], 目标函数的驱动来自可行解之间的支配关系和相互距离, NSGA-II 能进化出高质量的 Pareto 解集。

使用多目标优化算法 NSGA-II 对拟合响应式进行多目标优化, 各变量求解结果如表 3 所示。相对于初始值, D_1 和 D_3 修正后增大, 表示修正后的整体质量增大, 因为初始模型中忽略一部分零部件, 所以密度修正方向与预测方向一致; E_1 修正后减小, 表示修正后结构整体刚度变弱, 因为螺栓连接简化连接面绑定, 会导致局部刚度增大, 所以弹性模量修正方向与预测方向一致。

表 4 列出各个目标函数优化值和提升系数, $f_{e,i}$ 代表第 i 阶计算和试验模态频率差, MAC_i 表

示第 i 阶模态振型相关性。可以看出, NSGA-II 修正结果满足要求, 频率差均在 10% 以内, 振型相关性比初始值有些许增大, 均大于 0.8。

表 3 修正变量优化值 mm

Tab. 3 Optimum values of updating variables

变量	初始值	优化值
$D_1/E-9$	7.85	9.13
$E_1/E3$	200	192.09
$D_3/E-9$	7.85	11.80
$E_3/E3$	200	272.20

表 4 频率差和阵型相关性优化结果

Tab. 4 Optimum values of frequency differences and mode shapes correlations

变量	初始值	优化值	提升率
$f_{e,1}/\%$	34.12	6.36	81.36%
$f_{e,2}/\%$	16.36	6.33	61.31%
$f_{e,3}/\%$	31.86	4.01	87.41%
$f_{e,4}/\%$	7.08	1.72	75.71%
MAC_1	0.90	0.90	0.00%
MAC_2	0.83	0.87	4.82%
MAC_3	0.83	0.85	2.41%
MAC_4	0.80	0.91	13.75%

由表 4 可知, 修正后的前 4 阶模态与试验频率差分别减小了 81.36%, 61.31%, 87.41% 和 75.71%。图 9 为前 4 阶频率差的 Pareto 前沿, 理想的优化点靠近 0, 优化后的推荐点与预测一致。

使用模态动力学计算修正后的模型在冲击载荷激励下的结构响应, 各模态阻尼采用对应的试验模态阻尼, 计算结果与锤击试验响应做比较。锤击试验如图 10 所示, 锤击点位于前框架上部顶端, 锤击方向为 Y 向, 监测点位于后框架中上部, 采用加速度传感器监测为 Y 向响应。

图 11 和图 12 分别是监测点 Y 向的响应时域和频域曲线, 修正模型在振动响应量级和响应频率幅值均与试验接近, 模型可靠性高, 可用作下一步复杂载荷作用下的结构动力学响应预测。

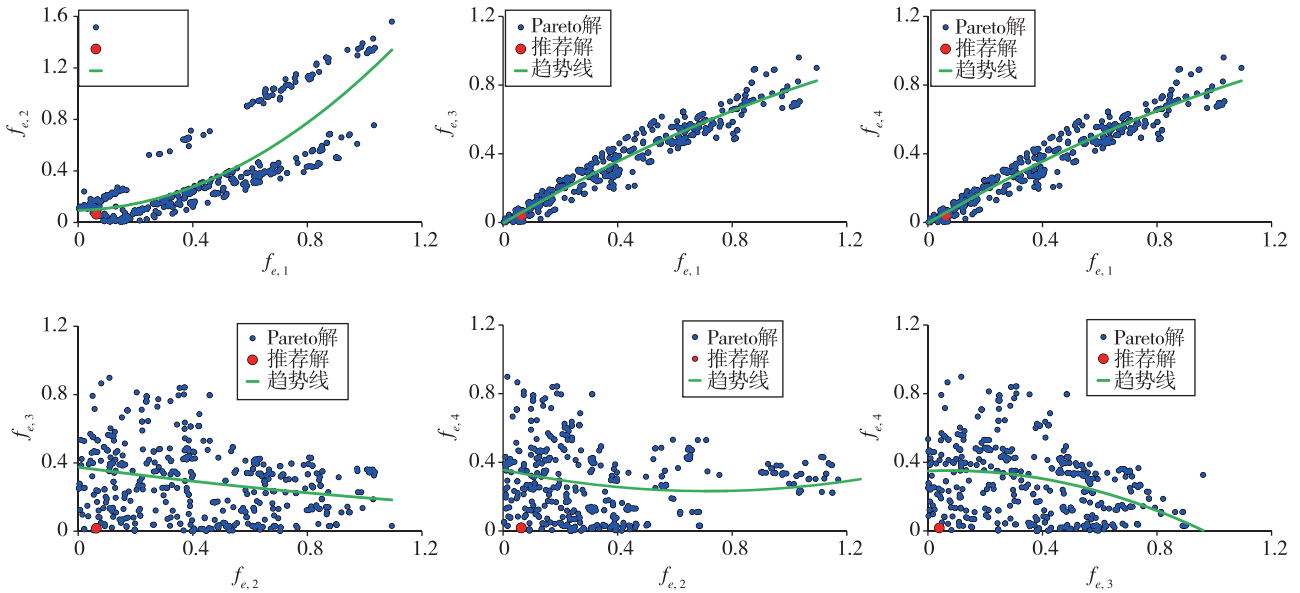


图9 前4阶频率的 Pareto 前沿

Fig. 9 Pareto fronts of the first four mode frequencies

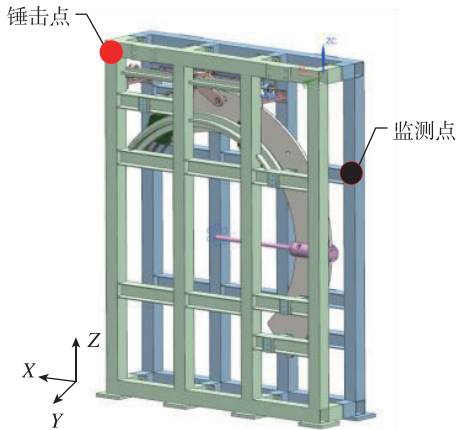


图10 锤击试验

Fig. 10 Impacting test

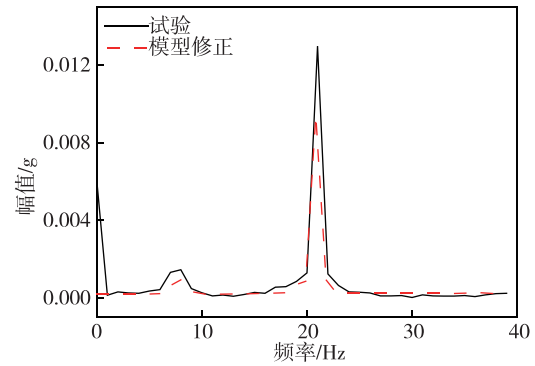


图12 频域响应曲线

Fig. 12 Frequency domain response

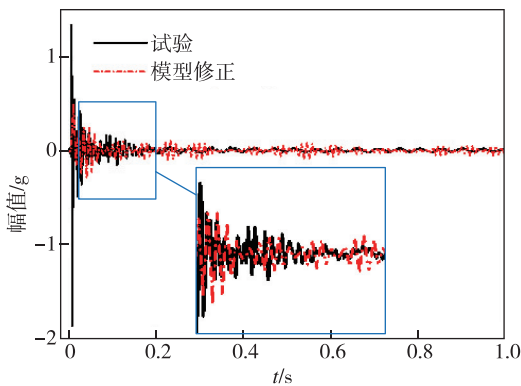


图11 时域响应曲线

Fig. 11 Time domain response

5 结论

1) 根据试验设计变量对响应的贡献量, 筛选修正变量; 采用近似建模方法构建修正变量和响应的响应面模型, 开展多个多目标优化方法的对比。结果显示: 使用 NSGA-II 修正后的模型支撑机构有限元模型修正结果满足工程需求, 修正后频率差均在 10% 以内, 振型相关性比初始值有些许增大, 均大于 0.8。

2) 基于修正后的有限元模型, 开展结构在锤击载荷作用下的模态动力学计算, 与锤击试验结果作比较, 两者振动加速度响应在时域量级和频域幅值匹配较好, 模型可靠性高, 可用作下一步复杂载荷作用下的结构动力学响应预测。

3) 搭建的结构有限元模型修正平台可实现优化流程自动化,提升设计分析效率,使设计人员专注于设计结果对工程问题的解决。

参考文献

- [1] 战家旺,高胜星,闫宇智,等.基于模型修正的公路简支板梁桥荷载横向分布系数计算方法[J].中国公路学报,2019,32(5):72-79.
- [2] 夏志远,李爱群,李建慧,等.基于 GMPSO 的有限元模型修正方法验证[J].工程力学,2019,36(10):66-74.
- [3] 方志,张国刚,唐盛华,等.混凝土斜拉桥动力有限元建模与模型修正[J].中国公路学报,2013,26(3):77-85.
- [4] 姜丹丹,臧朝平,梅庆,等.基于径向切比雪夫矩函数的结构动力学模型修正[J].航空动力学报,2016,31(3):555-566.
- [5] 麻越垠,陈万华,王元兴,等.基于响应面方法的叶栅摆装置有限元模型修正[J].振动与冲击,2016,35(22):232-236.
- [6] 张皓,李东升,李宏男.有限元模型修正研究进展:从线性到非线性[J].力学进展,2019,49:542-575.
- [7] 周林仁,欧进萍.斜拉桥结构模型修正的子结构方法[J].振动与冲击,2014,33(19):52-58.
- [8] 李伟明,洪嘉振,张以帅.新的模型修正与模态扩展迭代方法[J].振动与冲击,2010,29(6):4-7.
- [9] 朴思扬,祁峰,张亚辉.基于模态综合法的大型结构模型修正技术[J].应用数学和力学,2018,39(9):989-998.
- [10] 陈炉云,杨念.基于多层次权重系数的结构动力学模型修正[J].上海交通大学学报,2017,51(12):1415-1421.
- [11] 鲍诺,王春洁.基于响应面优化的结构有限元模型修正[J].北京航空航天大学学报,2014,40(7):927-933.
- [12] 张安平,陈国平.基于混合人工鱼群算法的结构有限元模型修正[J].航空学报,2010,31(5):940-945.
- [13] 魏锦辉,任伟新.结构有限元模型修正的自适应响应面方法[J].振动与冲击,2013,32(8):114-119.
- [14] 王巨涛,王春洁,宋顺广.结构加速度频响函数模型修正的 Kriging 方法[J].工程科学学报,2017,39(7):1087-1093.
- [15] 麻越垠,聂旭涛,陈万华,等.基于响应面法的低温风洞扩散段热力学模型修正[J].试验流体力学,2017,31(4):71-78.
- [16] 曹芝腑,姜东,吴邵庆,等.混合边界子结构的航空发动机机匣模型修正[J].航空动力学报,2017,32(11):2695-2704.
- [17] 吴思远,王正中,王岳,等.基于 Isight-MS.C.Patran/Nastran 联合仿真的弧形闸门动力模型修正[J].振动与冲击,2018,37(19):62-68.
- [18] 吴建云,王春洁,汪翰.月球着陆器模型参数修正[J].北京航空航天大学学报,2013,39(10):1366-1369,1375.
- [19] 李杰,高雄,王文竹,等.基于刚弹合成模型的重型汽车平顺性灵敏度分析[J].振动与冲击,2018,37(13):85-91.
- [20] 李永洲,张堃元,王磊,等.马赫数分布可控的基准流场灵敏度分析与优化设计[J].航空动力学报,2013,28(4):765-774.
- [21] 杨智春,王乐,丁燕,等.基于附加已知刚度的动力学模型修正方法[J].工程力学,2009,26(5):19-24.
- [22] 郭力,李兆霞,高效伟.基于复域灵敏度分析的静力模型修正方法研究[J].工程力学,2010,27(8):100-106.
- [23] 杜大华,贺尔铭,李磊.改进模拟退火算法的喷管动力学模型修正[J].宇航学报,2018,39(6):632-638.
- [24] 周林仁,欧进萍.基于径向基函数响应面方法的大跨度斜拉桥有限元模型修正[J].中国铁道科学,2012,33(3):8-15.
- [25] 杨木森,张可,吴浩,等.考虑内压影响的加筋柱壳高效屈曲优化[J].宇航总体技术,2019,3(6):30-38.
- [26] 李庆龙,郑亚茹,徐明.空中发射运载火箭弹道优化设计[J].宇航总体技术,2020,4(5):8-15.

引用格式:麻越垠,郝鹏,马斌,等.风洞模型支撑机构有限元模型修正与确认[J].宇航总体技术,2021,5(5):51-59.

Citation: Ma Y Y, Hao P, Ma B, et al. Finite element model updating and validating for model support mechanism of wind tunnel [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(5): 51-59.