

基于扩展工况传递路径分析的振动环境 预计方法研究

李益萱, 刘继军, 李凯翔, 白春玉

(中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:准确获得飞机结构及机载设备的振动环境至关重要,传统的振动环境预计方法预计准确度低,可能会导致后期振动环境试验过试验或欠试验的问题。创新性地提出了一种基于扩展工况传递路径分析(OPAX)的振动环境预计方法,采用实测数据搭建振动环境预计模型,再利用该模型对新工况下的振动环境进行预计。试验室环境下,搭建了某型飞机典型设备舱振动测试系统,基于 OPAX 方法搭建了机载设备的振动环境预计模型,并对其预计准确度进行了验证。对比预计结果与试验结果,得到:①新工况下模型预计均方根值与试验测试均方根值相比,误差保持在 20% 以内;②在预计频段范围内,新工况下模型预计的变化趋势与试验测试基本一致,个别频率处差异较大。综合新工况下预计结果,这种基于 OPAX 的振动环境预计方法预计精度较高,且搭建模型所需数据量较少,搭建方便,具有可操作性和工程实用价值。

关 键 词:OPAX; 飞机设备舱; 振动环境预计; 载荷识别

中图分类号:V214.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2022)06-1320-07

飞机的振动环境对于飞机机体和机载设备,是比较严酷的一种使用环境。振动对飞机的飞行安全和机载设备的正常使用都有严重影响^[1]。国内对飞机振动环境预计技术的研究始于 20 世纪 80 年代中期,通用的预计方法有以下 3 种^[2-4]:①算法;②统计法;③经验公式法。这 3 种预计方法或预计准确度较低,或数据来自美国早期型号,如采用这些方法来预计我国新型飞机飞行振动环境,可能导致后期振动环境试验过试验或欠试验^[5]。近年来发展出的一种基于神经网络的新方法,由于其预计速度快、精度高,有了一定的应用,然而预计过程中需要大量的样本训练,实际情况可能并不允许^[6]。

对于飞机振动环境的预计,可以从“源-路径-接受者”模型的角度出发,即可以认为振动响应是多个激励源通过不同的传递路径抵达目标后矢量叠加形成的,这种从多源和多路径的综合角度分析和预测目标的振动响应,可以采用传递路径分析方法来实现。通过建立振动传递路径模型,还可以获得

结构的振动传递特性,这样,不仅可以预测结构在不同激励下的响应,还可以研究结构本身,并有针对性地对结构进行优化和改进^[7-8]。

1 扩展工况传递路径分析的基本理论

飞机结构较为复杂,而且在飞行过程中受到多种载荷的同时激励,但从动力学的角度仍然可以分为三部分:输入载荷、输出响应、联系输入输出的结构传递特性。振动传递路径分析方法^[9-10]就是研究这种结构振动特性的有效方法。

假设结构为线性时不变结构,则可以采用传统传递路径分析方法表示为公式(1)

$$y_k(\omega) = \sum_{i=1}^u H_{ki}(\omega) \times F_i(\omega) \quad (1)$$

式中: $y_k(\omega)$ 为系统第 k 个振动响应输出; $F_i(\omega)$ 为系统第 i 个输入载荷; $H_{ki}(\omega)$ 为第 i 个输入到第 k 个输出的传递函数,这里为频响函数; ω 为频率; u 为传

递路径数量。

扩展工况传递路径分析方法 (OPAX) 称为使用外部输入的工况传递路径分析方法^[11], 是基于悬置动刚度方法开发出来的, 仍可采用传统传递路径分析方法的理论公式, 但采用了创新的方法进行载荷识别, 即参数化载荷模型缩减数据, 见公式 (2)。

$$y_k(\omega) = \sum_{i=1}^u H_{ki}(\omega) \times F_i(a_{ai}(\omega), a_{pi}(\omega)) \quad (2)$$

式中: $y_k(\omega)$, $H_{ki}(\omega)$, ω , u 同公式 (1)。 $F_i(\omega)$ 根据公式 (3) 进行载荷识别。

$$F_i(\omega) = K_i(\omega) \times \frac{a_{ai}(\omega) - a_{pi}(\omega)}{-\omega^2} \quad (3)$$

待识别的载荷可以表示为结构悬置或连接位置处动刚度与位移的乘积, 位移采用悬置端两侧加速度来表示, 可以通过试验测试得到, $K_i(\omega)$ 为其动刚度函数。需要注意的是, 需要识别从激励源处至响应预计目标点所有路径悬置端或连接位置载荷, 不可以遗漏。

图 1 展示了一个搭建的 OPAX 系统模型, 包含主动端 (结构载荷 $F_i(\omega)$) 和被动端 (目标点 $y_k(w)$, $k = 1, \cdots, u$, 额外显示点 $u_q(\omega) q = 1, \cdots, v$)^[12], 额外显示点是为了增加载荷识别精度额外增加的响应测试点。飞机上典型的例子就是将机载设备支架看做被动端, 将支持设备支架的机舱结构看做主动端。

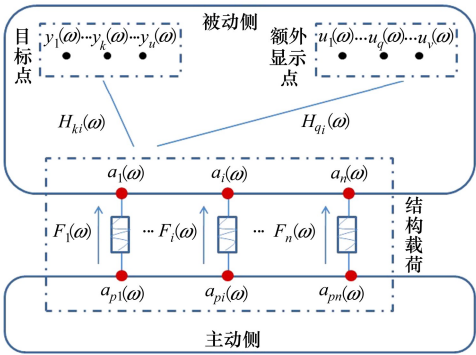


图 1 OPAX 系统模型示意图

2 搭建振动环境预计模型

2.1 搭建背景

图 2 为某飞机典型设备舱结构, 飞机飞行过程中, 气动载荷及其他振动载荷作用在设备舱蒙皮及主梁结构上, 通过铆接结构传递至设备支架, 再传递至机载设备安装位置, 在此安装位置产生加速度响

应。试验中, 设备模拟盒模拟机载设备安装位置, 即设备模拟盒处为振动环境预计目标点。

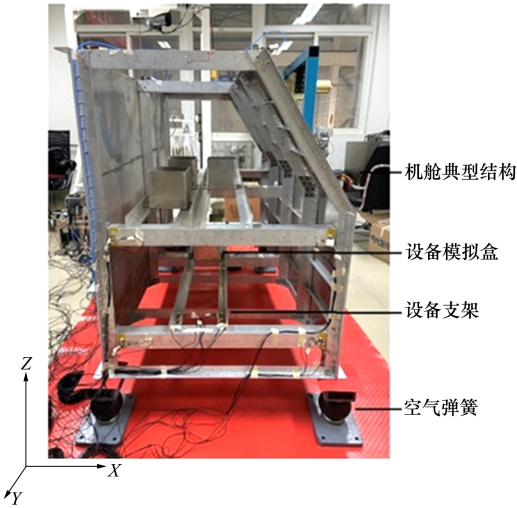
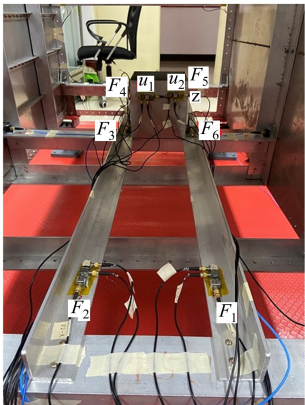
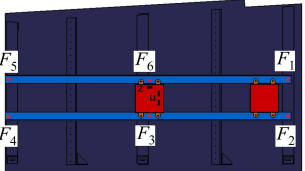


图 2 某型飞机模拟设备舱结构

基于 OPAX 方法, 搭建飞机典型设备舱结构的振动环境预计模型。本次试验选取舱段下层的中间设备模拟盒上响应点为目标点 z , u_1 及 u_2 是为了提高模型预计精度的额外显示点, 被动端为图 3b) 中浅蓝色与红色部分, 需要识别的载荷有 6 个, 分别为载荷 $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ (见图 3), 下文以目标点 z 为例, 基于 OPAX 方法搭建设备模拟盒处的振动环境预计模型, 所有响应及载荷均考虑 3 个方向。



a) 试验现场图



b) 示意图

图 3 试验目标点和载荷识别位置

2.2 试验测试及模型搭建

2.2.1 试验测试

振动环境为正弦扫频环境,采用激振器对典型设备舱结构进行激励,不同工况在设备舱不同位置激励以区分,试验共测试了 6 种工况,第一种工况用来搭建传递路径预测模型,后 5 种工况用来验证模型,激振位置如图 4 所示。为了保证设备舱结构振动传递路径清晰,6 种工况激励点均在设备舱梁结构上,振动载荷可以直接传递至设备支架再到目标设备盒处。

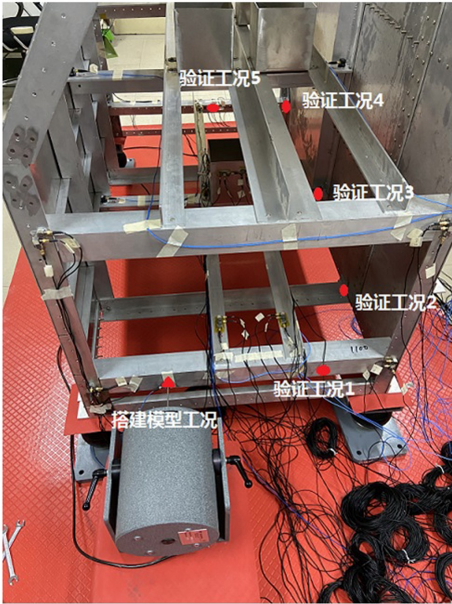


图 4 工况测试加载位置示意图

图 5 为基于 OPAX 方法搭建的机载设备振动环境预计模型,需要测试的数据有以下 2 类^[13]:

- 1) 频响函数 FRF 测试
 - 从铆接结构载荷识别处到目标点的 FRF 测试 $H_i(\omega) (i = 1, \dots, 18)$;
 - 从铆接结构载荷识别处到显示点的 FRF 测试 $H_{pi}(\omega) (p = 1, 2; i = 1, \dots, 18)$ 。
- 2) 工况测试量
 - 响应点测试量: 目标点 $z(\omega)$ 的加速度测试,也可以包括额外显示点 $u_p(\omega) (p = 1, 2)$ 的加速度测试,目标点和显示点均测试 X, Y, Z 方向;
 - 路径输入点测试量: 结构载荷输入,悬置主被动端加速度数值 $a_i(\omega) (i = 1, \dots, 18)$,因为主动端和被动端为铆接结构,所以主 / 被动端一个铆接点只需要测量一处加速度值,3 个方向 (X, Y, Z)。

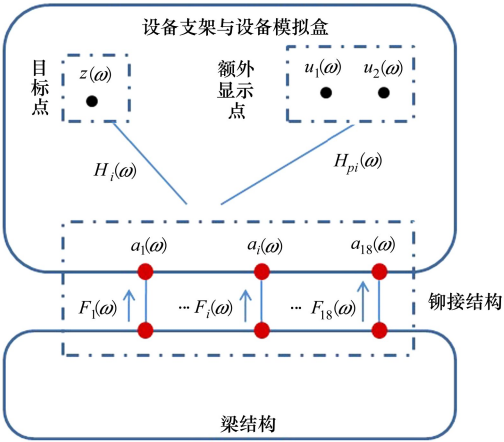


图 5 基于 OPAX 方法的机载设备振动环境预计模型

2.2.2 模型搭建

1) 参数化载荷识别

模型搭建过程中,主动端和被动端连接部位的载荷识别是一项重要的步骤,一般采用 2 种模型:单自由度模型(SDOF 模型)与参数化模型-多级带宽模型(MB 模型)^[14-15]。一般情况下,当明确连接部位包含弹性元件时,采用 SDOF 模型,而当系统中存在刚性连接或是对连接形式预先不了解时,采用更为普遍的 MB 模型。本次模型搭建由于连接部位为螺栓连接,为刚性连接,采用 MB 模型进行参数识别。

在 MB 模型中动刚度可以表示为

$$K_i(\omega) = k_i \tag{4}$$

式中, k_i 为 MB 模型中某固定频率段内的动刚度等效常数值,在 OPAX 方法中,所有被划分频段内的 k_i 均需要进行识别,这种多级带宽模型如图 6 所示。

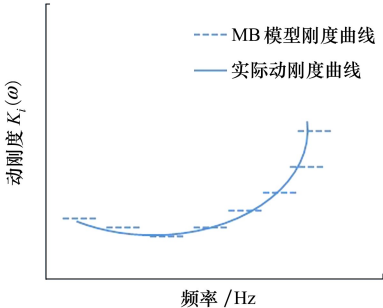


图 6 MB 模型

采用 MB 模型进行参数化载荷识别,在每一带宽内建立方程并加以求解,目标点 z 和额外显示点 u_p 可以表示为

$$\begin{cases} z = \sum_{i=1}^{18} H_i(\omega) F_i(\omega) = \sum_{i=1}^{18} H_i(\omega) k_i(\omega) \frac{a_i(\omega)}{-\omega^2} = \sum_{i=1}^{18} k_i(\omega) G_i(\omega) \\ u_p = \sum_{i=1}^{18} H_{pi}(\omega) F_i(\omega) = \sum_{i=1}^{18} H_{pi}(\omega) k_i(\omega) \frac{a_i(\omega)}{-\omega^2} = \sum_{i=1}^{18} k_i(\omega) G_{pi}(\omega) \end{cases} \quad (5)$$

依照(5)式,待识别参数共有 18 个,为 $k_i(i=1, \cdots, 18)$ 。建立相应求解方程组时,首先考虑目标点和额外显示点数目,每一点都有 3 个方向(X, Y, Z),共有 9 组方程;MB 模型中,取带宽为 20 Hz,带宽内每 4 Hz 取 1 次值,即带宽 20 Hz 内有 5 个方程。所以每个频带内,共有 9×5 个方程,用来识别 18 个参数,为超定方程求解问题,采用奇异值分解(SVD)方法求解^[16-18]。

2) 典型设备舱结构振动环境预计模型的搭建
试验中,激励载荷采用 20~2 000 Hz 的扫频载荷。试验中采集到的数据为时域信号,需要采集一定时间的稳态数据做 FFT 变换。然而,在正弦扫频时,测试到的响应一直在变化中,借鉴旋转结构阶次图,转速匀加速时在各转速处进行快速 FFT 变换,即把一窄频率带中采集的时域响应数据近似看做某频率点的稳态时域响应数据,进行快速 FFT 变换。

基于公式(5),采用工况 1 的数据进行载荷识

别,求解出参数 $k_i(i=1, \cdots, 18)$ 。利用新工况的数据代入公式(6),对该工况下目标点的振动环境进行预计。

$$z(\omega) = \sum_{i=1}^{18} k_i(\omega) G_i(\omega)$$
$$G_i(\omega) = H_i(\omega) \times \frac{a_i(\omega)}{-\omega^2} \quad (i=1, \cdots, 18) \quad (6)$$

3 基于 OPAX 的振动环境预计模型验证

通过搭建的典型设备舱结构振动环境预计模型,对新工况下目标点的响应进行预计,与该工况下试验测量值进行对比,选取工况 1、工况 4 和工况 5 对比情况进行展示,如图 7~9 所示。

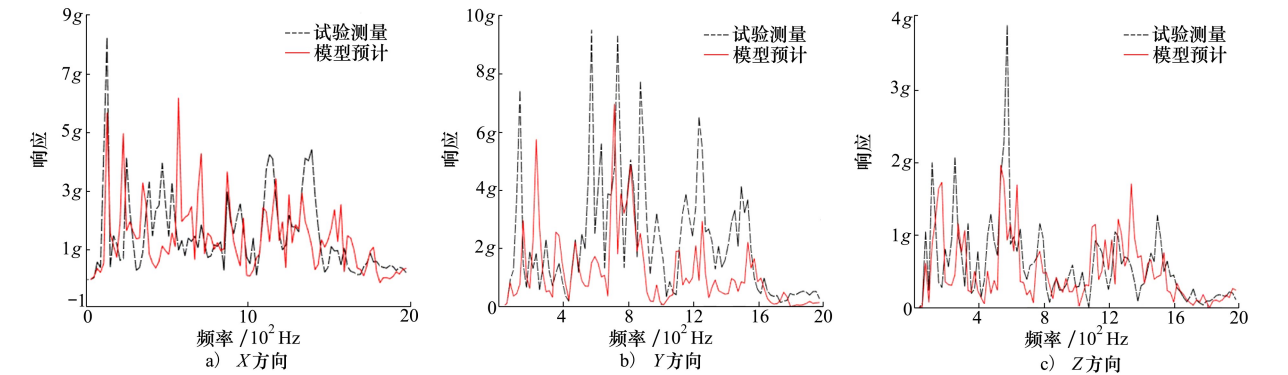


图 7 工况 1 振动环境预计响应与试验测试对比

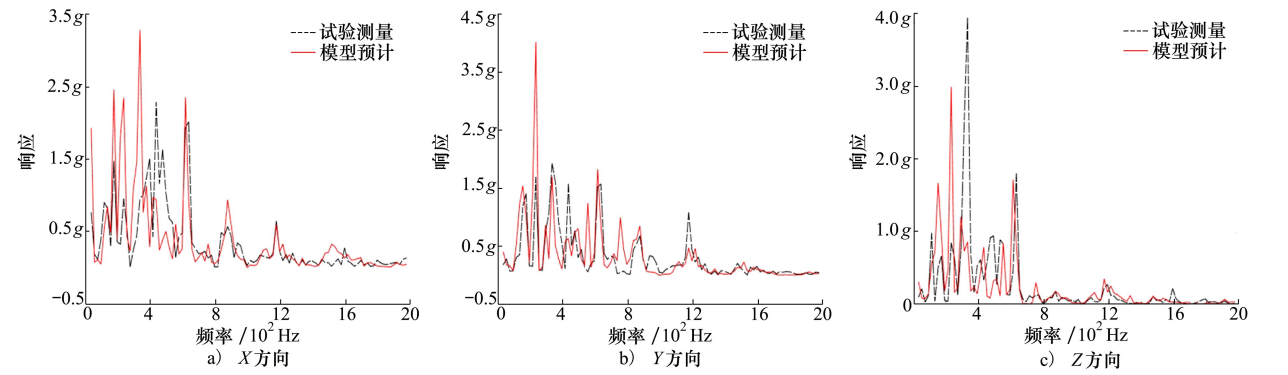


图 8 工况 4 振动环境预计响应与试验测试对比

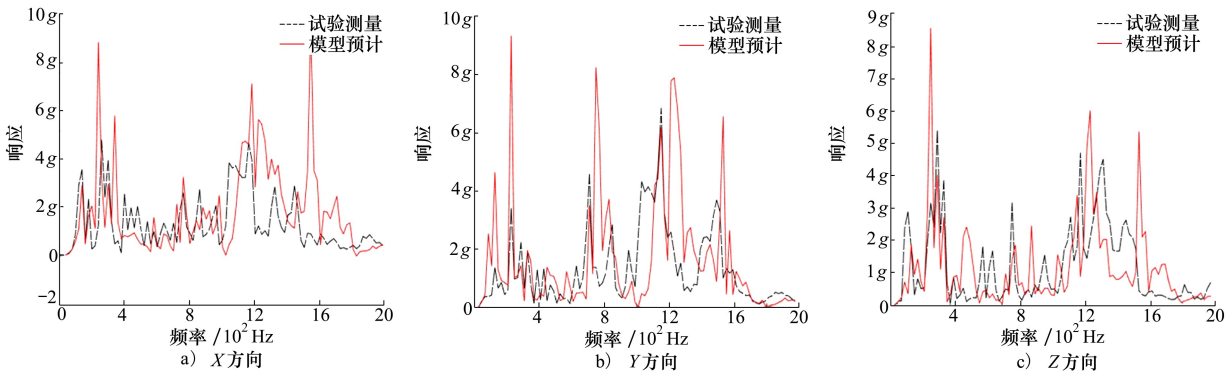


图9 工况5 振动环境预计响应与试验测试对比

总结图 7~9,在验证工况下,模型预计值与真实试验测试值在 20~2 000 Hz 的频段中变化趋势保持一致,个别频率处存在差异较大的情况。

计算 5 种新工况下典型设备舱结构的预计均方根值与试验测量均方根值,见表 1,误差百分比基本保持在 20%以内。对比图 7~9 中预计值的峰值频率,总体上各工况预计值的峰值频率与试验测试值变化趋势一致,但也存在峰值大小不一致(工况 1 和工况 4))和峰值频率移动(工况 5)的现象,经分析认为有两方面的原因:①载荷识别位置到设备模拟盒处的频响函数测试受到了整体设备舱模态的影响,

导致频响函数测试不准确;②搭建 OPAX 模型过程中包括求解超定方程组问题,虽然已采用了奇异值分解方法对其预计准确度进行了改进,但依然存在不可忽略的误差。

4 结 论

本文针对飞机振动环境预计精度低和数据需求量大问题,创新性地提出采用扩展工况传递路径方法(OPAX)进行飞机机载设备和结构的振动环境预计。在试验室环境下搭建了某型飞机典型设备舱结构测试系统,通过测试数据搭建了基于 OPAX 的结构振动环境预计数学模型,对另外 5 种新工况下目标点的振动环境进行了预计,并与真实试验目标点响应进行了对比,得出以下结论:

1) 5 种新工况下,模型预计值与真实试验测试值在 20~2 000 Hz 的频段中变化趋势保持一致,个别频率处存在差异较大的情况;

2) 比较 5 种新工况下典型设备舱结构的预计均方根值与试验测量均方根值,误差百分比大部分都能保持在 15%以内,误差相差较大处,基本为各工况目标点的 Y 向响应;

3) OPAX 方法中,工况下的载荷识别问题为关键,在进行载荷矩阵识别时,需要求解超定方程组,本文采用了奇异值分解法对预计模型的准确度进行了改进,但对于求解超定方程组的问题,还需探索进一步提高其抗干扰性和高精度的求解方法。

表 1 典型设备舱结构振动环境预计模型预计误差			
预计工况	预计均方根值/g	测试均方根值/g	误差百分比/%
工况 1	X 方向	1.054	1.115
	Y 方向	1.000	0.900
	Z 方向	0.665	0.734
工况 2	X 方向	0.223	0.260
	Y 方向	0.294	0.265
	Z 方向	0.224	0.232
工况 3	X 方向	0.345	0.386
	Y 方向	0.433	0.360
	Z 方向	0.347	0.335
工况 4	X 方向	0.190	0.223
	Y 方向	0.310	0.389
	Z 方向	0.230	0.201
工况 5	X 方向	0.912	0.880
	Y 方向	1.156	0.918
	Z 方向	0.824	0.809

参考文献:

- [1] 施荣明. 现代战斗机结构动强度设计技术指[M]. 北京:航空工业出版社, 2012
SHI Rongming. Technical guide for dynamic strength design of modern fighter structures[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012 (in Chinese)
- [2] PIERSOL A G. Summary of random vibration prediction procedures[R]. NASA CR-1302, 1967
- [3] US DOD. Environmental engineering considerations and laboratory tests[S]. MIL-STD-810H, 2019: 320-321
- [4] FULLER Scharton. Assessment of space vehicle aeroacoustic-vibration prediction and testing[R]. NASA CR-1596, 1970
- [5] 王光芦, 徐明, 李大鹏. 飞机飞行振动预计技术[J]. 航空工程进展, 2010, 8: 251-255
WANG Guanglu, XU Ming, LI Dapeng. Aircraft flight vibration prediction methodology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 8: 251-255 (in Chinese)
- [6] 刘昭, 徐俊, 胡小兵. 基于深度置信网络的机载外挂振动预计方法[J]. 航空动力学报, 2021, 6: 1197-1205
LIU Zhao, XU Jun, HU Xiaobing. Vibration prediction method of aircraft external stores based on deep belief network[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 6: 1197-1205 (in Chinese)
- [7] 庞晓柯. 基于工况传递路径分析的挖掘机座椅振动研究[D]. 济南: 山东大学, 2011
PANG Xiaoke. Excavator seat vibration research based on operational transfer path analysis[D]. Jinan: Shandong University, 2021 (in Chinese)
- [8] KRISHNA R D, FREDERICK J Z, SHAN Uhaq. Application of noise path target setting using the technique of transfer path analysis[C]//SAE 2003 Noise & Vibration Conference and Exhibition, 2003
- [9] 李云红. 信号与系统[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012
LI Yunhong. Signals and systems[M]. Beijing: Peking University Press, 2012 (in Chinese)
- [10] 舒俊成, 贺尔铭, 易金翔, 等. 发动机振动载荷向客舱座椅传递特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(6): 1163-1170
SHU Juncheng, HE Erming, YI Jinxiang, et al. Research on transfer characteristics of engine vibration load to cabin seat[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(6): 1163-1170 (in Chinese)
- [11] 谭祥军. 旋转机械 NVH 分析与 TPA 分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020
TAN Xiangjun. The NVH analysis of the rotating machinery and TPA analysis[M]. Beijing: China Machine Press (in Chinese)
- [12] 宋海生. 基于扩展 OPAX 传递路径方法的轻型客车振动控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012
SONG Haisheng. Research on vibration control of light bus based on improved operational-X transfer path analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2012 (in Chinese)
- [13] JANSSENS K. OPAX: a new transfer path analysis method based on parametric load models[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 25(4): 1321-1338
- [14] WYCKAERT K, AUWERAER V. Operational analysis, transfer paths analysis, modal analysis: tools to understand road noise problems in cars[C]//Proceedings of the 1995 Noise and Vibration Conference, 1995
- [15] PLUNT J, KAMPH E, FOTHERGILL D. Dynamic analysis and acoustic optimization of the volvo multi-link rear suspension[C]//Proceedings of the 1989 Noise and Vibration Conference, 1989
- [16] NOUMURA K, YOSHIDA J. Method of transfer path analysis for interior vehicle sound by actual measurement[J]. Honda R&D Technical Review, 2006, 18(1): 136-141
- [17] DEVIJYER P, KITTLER J. Pattern recognition: a statistical approach[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1982
- [18] KOHAVI R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection[C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1995

The vibration environment prediction method based on OPAX

LI Yixuan, LIU Jijun, LI Kaixiang, BAI Chunyu

(Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: It is widely known that obtaining the vibration environment of the aircraft structure and airborne equipment accurately is very important. The traditional vibration environment prediction method always has low accuracy, which may lead to the problem of over-test or under-test in the later vibration test. In this study, an innovative vibration-environment-prediction method is put forward based on operational path analysis with exogenous inputs (OPAX) method. In the laboratory, the vibration testing system is built, which focuses on one typical equipment cabin. Adopting the testing data, a vibration environment prediction model is set up, and its accuracy is verified under new loading condition. Through comparative analysis of prediction and test results, the conclusions can be drawn that: ①the error of the RMS value of the prediction model is kept within 20% when compared with the RMS value of the real testing data; ②within the frequency band range, the change trend of the prediction result is basically consistent with that of the test result, only at some individual frequencies, there is a big difference. It can be concluded that the prediction model built in this paper, which has high accuracy and is convenient to build, has a relatively high engineering practical value.

Keywords: OPAX; aircraft equipment cabin; vibration environment prediction; load identification

引用格式: 李益萱, 刘继军, 李凯翔, 等. 基于扩展工况传递路径分析的振动环境预计方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(6): 1320-1326

LI Yixuan, LIU Jijun, LI Kaixiang, et al. The vibration environment prediction method based on OPAX[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(6): 1320-1326 (in Chinese)