

采用 NSGA-II 算法的发动机组件试验边界优化设计*

耿子强¹, 张允涛², 王 珺², 谢石林¹

(1. 西安交通大学航天航空学院 西安, 710100)

(2. 西安航天动力研究所液体火箭发动机技术重点实验室 西安, 710100)

摘要 为了实现液体火箭发动机组件在地面力学环境试验中的响应与实际工作状态下的响应特征一致,提升组件试验考核的有效性,从边界映射途径出发,讨论了组件力学环境响应一致的边界映射问题的理论求解,提出了通过设计优化进行组件试验边界映射的工程解决方法。基于二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms-II,简称 NSGA-II)和有限元联合仿真,对某型发动机推力装置组件地面力学环境试验的边界约束结构进行优化设计,获得了满足响应特征要求的组件试验边界约束结构形式,并进行了试验验证。结果表明:试验与仿真优化结果吻合良好,组件关键部位响应特征满足目标要求;通过试验边界约束结构优化设计方法进行边界映射,能够实现组件地面试验响应与实际状态响应特征等效一致。

关键词 力学环境试验;边界映射;响应等效;边界约束;遗传算法;优化设计

中图分类号 V431

引 言

火箭发动机在工作期间承受着复杂的振动、冲击载荷等,为保证发动机在工作期间的结构功能正常,需要对发动机及其组件开展全面有效的地面力学环境试验^[1-4],通过地面试验模拟发动机实际工作中的振动、冲击等力学环境,以考核发动机整机或组件的环境适应性能,进而对产品设计方案进行验证和改进^[5-6],同时还应尽可能地避免产生“欠试验”或“过试验”^[7]。

在发动机研制过程中,通常需要对发动机的某些关键组件进行单独的地面力学环境试验,而组件地面试验的响应与其在实际工作状态下的响应是否一致^[8-10]是判断试验有效性的重要依据。由于组件地面试验时的力学环境与其实际工作状态下的力学环境存在差异,为了实现响应一致,必须对组件地面试验时的力学环境进行设计。结构的力学环境由边界约束条件和载荷条件共同决定^[11],当给定组件地面试验的边界约束条件时,其力学环境设计可归结为激励载荷的设计,即载荷映射问题^[12-14]。基于载荷映射方法可由实际工作时的组件响应求得组件地面试验时所需的载荷量级及其谱型,从而实现响应一致的目的。在不改变激励形式的前提下,通过对发动

机组件地面试验时的边界约束结构^[15](即夹具结构)进行设计,来实现发动机组件在地面试验和实际工作两种力学环境下的响应一致,称为边界映射问题。

实际地面试验时,组件的边界约束主要由夹具及其连接结构提供。传统的刚性夹具使得试验系统的机械阻抗及界面力等动力学行为与实际状态发生偏离,从而导致对组件的“过试验”考核。近年来,柔性夹具、弹性连接以及夹具的耦合作用等研究受到广泛关注^[16-17],成为夹具的动力学边界效应分析评估的新思路。

本研究讨论了基于发动机组件响应特征一致的试验边界映射问题的理论求解,提出了发动机组件地面试验边界优化设计方法,利用 NSGA-II 优化算法,通过 Matlab 与 ANSYS 联合仿真,以发动机典型组件在地面试验与模拟实际工况中的频率和振动响应特征一致为优化目标,开展了组件地面试验时的边界约束优化设计研究,并通过振动试验对边界约束优化设计方案进行了验证。

1 发动机组件试验边界映射的理论求解方法

在实际工况与地面试验两种不同力学环境下,

* 国家自然科学基金资助项目(11872290)

收稿日期:2022-07-13;修回日期:2023-02-08

发动机组件固定于不同边界结构上,受相同形式的激励,两种力学环境的简化示意图如图1所示。其有限元形式的动力学方程为

$$(\mathbf{M}_{ai} + \mathbf{M}_{bi})\ddot{\mathbf{x}}_i + (\mathbf{C}_{ai} + \mathbf{C}_{bi})\dot{\mathbf{x}}_i + (\mathbf{K}_{ai} + \mathbf{K}_{bi})\mathbf{x}_i = \mathbf{f}(t)\mathbf{P}_{fi} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 分别为总体质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; $\mathbf{x}_i$ 为总体位移; $\mathbf{f}(t)$ 为激励; $\mathbf{P}_f$ 为激励作用的位置矩阵;矩阵下标a和b分别表示由发动机组件结构内部单元自由度构成的矩阵和由边界约束单元自由度构成的矩阵; i 为力学环境编号, $i=1$ 表示发动机组件实际工况时的力学环境, $i=2$ 表示发动机组件地面试验时的力学环境。

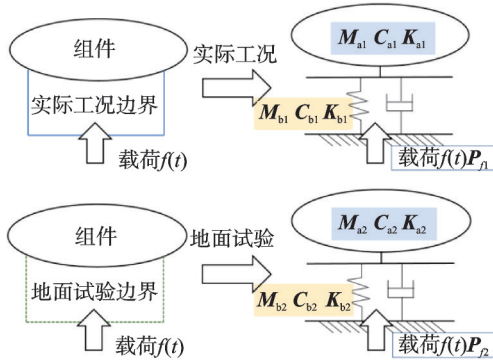


图1 两种力学环境的简化示意图

Fig.1 Simplified schematic diagrams of two mechanical environments

不同的力学环境主要影响试验边界约束单元。在边界映射问题中,发动机组件结构内部自由度一般远小于试验边界约束自由度,因此结构内部单元对应的总体矩阵中仅存在少量非零元素。为简化描述,这里引入位置矩阵 $\mathbf{P}$,将总体矩阵与局部矩阵的关系表示为

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{ai} = \mathbf{P}_{ai} \bar{\mathbf{M}}_a \mathbf{P}_{ai}^T \\ \mathbf{C}_{ai} = \mathbf{P}_{ai} \bar{\mathbf{C}}_a \mathbf{P}_{ai}^T \\ \mathbf{K}_{ai} = \mathbf{P}_{ai} \bar{\mathbf{K}}_a \mathbf{P}_{ai}^T \\ \mathbf{M}_{bi} = \mathbf{P}_{bi} \bar{\mathbf{M}}_{bi} \mathbf{P}_{bi}^T \\ \mathbf{C}_{bi} = \mathbf{P}_{bi} \bar{\mathbf{C}}_{bi} \mathbf{P}_{bi}^T \\ \mathbf{K}_{bi} = \mathbf{P}_{bi} \bar{\mathbf{K}}_{bi} \mathbf{P}_{bi}^T \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\bar{\mathbf{M}}, \bar{\mathbf{C}}, \bar{\mathbf{K}}$ 分别为相关单元的集中质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵。

将式(2)代入式(1),经Fourier变换后得到

$$\mathbf{P}_{ai} (\bar{\mathbf{K}}_a - \omega^2 \bar{\mathbf{M}}_a + j\omega \bar{\mathbf{C}}_a) \mathbf{P}_{ai}^T \mathbf{X}_i + \mathbf{P}_{bi} (\bar{\mathbf{K}}_{bi} - \omega^2 \bar{\mathbf{M}}_{bi} + j\omega \bar{\mathbf{C}}_{bi}) \mathbf{P}_{bi}^T \mathbf{X}_i = \mathbf{F} \mathbf{P}_{fi} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{X}$ 为节点自由度总体响应谱; $\mathbf{F}$ 为激励谱; ω 为激励频率。

将总体响应 $\mathbf{x}_i$ 分为发动机组件结构内部自由

度响应 $\mathbf{x}_{ai}$ 与约束边界自由度响应 $\mathbf{x}_{bi}$,若发动机组件在两种力学环境下满足响应等效,组件的响应谱相等,即 $\mathbf{X}_{a1} = \mathbf{X}_{a2}$ 。组件结构内部自由度响应可由组件位置矩阵与总体响应共同表示,即

$$\mathbf{X}_{ai} = \mathbf{P}_{ai}^T \mathbf{X}_i \quad (4)$$

记 $\mathbf{H}$ 为系统的频响函数矩阵,根据频响函数 $\mathbf{X}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{F}_i$,并将其展开后有

$$\mathbf{H}_i = [\mathbf{P}_{ai} \mathbf{D}_0 \mathbf{P}_{ai}^T + \mathbf{P}_{bi} \mathbf{D}_i \mathbf{P}_{bi}^T]^{-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{D}_0 = \bar{\mathbf{K}}_a - \omega^2 \bar{\mathbf{M}}_a + j\omega \bar{\mathbf{C}}_a \quad (6)$$

$$\mathbf{D}_i = \bar{\mathbf{K}}_{bi} - \omega^2 \bar{\mathbf{M}}_{bi} + j\omega \bar{\mathbf{C}}_{bi} \quad (7)$$

以组件响应谱相等为目标,联立式(4)~(7)可得

$$\mathbf{P}_{ai}^T (\mathbf{P}_{ai} \mathbf{D}_0 \mathbf{P}_{ai}^T + \mathbf{P}_{bi} \mathbf{D}_i \mathbf{P}_{bi}^T \mathbf{X}_i) = \mathbf{P}_{ai}^T \mathbf{F} \mathbf{P}_{fi} \quad (8)$$

结合位置矩阵的性质 $\mathbf{P}^T \mathbf{P} = \mathbf{I}$,整理后可得

$$\mathbf{P}_{a1}^T (\mathbf{P}_{b1} \mathbf{D}_1 \mathbf{P}_{b1}^T \mathbf{H}_1 - \mathbf{I}) \mathbf{P}_{f1} = \mathbf{P}_{a2}^T (\mathbf{P}_{b2} \mathbf{D}_2 \mathbf{P}_{b2}^T \mathbf{H}_2 - \mathbf{I}) \mathbf{P}_{f2} \quad (9)$$

式(9)就是以发动机组件所有自由度响应一致为目标,采用边界映射方法需要满足的条件。由于理论解与激励频率相关且形式复杂,试验边界约束条件难以直接用于实际设计,因此需要探索工程可行的试验边界映射求解方法。

2 发动机组件试验边界映射的优化求解方法

为了降低发动机组件试验边界映射求解的难度,并考虑到实际工程中只需满足两种力学环境下发动机组件关键自由度上的响应近似一致,笔者提出发动机组件试验边界映射的数学求解方法,即

$$J = \sum_{n=1}^{n_0} \|(\ddot{\mathbf{X}}_{a1})_n - (\ddot{\mathbf{X}}_{a2})_n\|_2 \quad (10)$$

其中: $(\ddot{\mathbf{X}}_{a1})_n, (\ddot{\mathbf{X}}_{a2})_n$ 为两种力学环境下发动机组件第 n 个自由度的加速度响应谱^[18]; $\|\cdot\|_2$ 为2范数。

事实上,式(10)可转化为寻找参数 J 最小的优化求解问题,考虑到 $\mathbf{D}_2, \mathbf{P}_{b2}, \mathbf{H}_2$ 作为有限元的理论形式难以进行直接优化,但组件夹具的结构形式与几何尺寸都会对上述矩阵产生影响,因此本研究预设试验边界约束结构基本形式,并将其几何尺寸作为优化参数。

笔者采用遗传算法进行优化问题的求解,即将遗传算法与有限元计算相结合,对试验边界约束结构的几何参数进行优化设计求解^[19-21]。遗传算法以生物进化理论为基础,通过评估个体的适应度并不断迭代进化以获得最优解。快速非支配排序多目标优化遗传算法(NSGA-II)融合Pareto最优思想,将

个体通过非支配层分层排序,采用拥挤度算子减小个体的聚集程度,利用精英保留策略等措施,提高了收敛速度,是一种有效的优化方法^[22]。为实现优化求解,采用 Matlab 作为主程序运行遗传算法,同时调用 ANSYS Batch 完成有限元仿真计算,并通过 TXT 文本互相传递数据。Matlab-ANSYS 联合仿真流程如图 2 所示,具体过程如下:

- 1) 对组件实体建模并保存为 X_T 文件,采用 ANSYS 的参数化设计语言(ANSYS parametric design language,简称 APDL)编写参数读入、结果输出以及有限元计算的宏文件;
- 2) 在 Matlab 中设定种群迭代数,利用二进制编码随机产生初始种群,经转换后成为初始设计参数集;
- 3) 调用 ANSYS Batch 运行宏文件,依次序进行参数集数据读取、试验边界建立、组件组装及有限元计算,最后向 Matlab 传递结果作为优化评价特征值;
- 4) 在 Matlab 中采用 NSGA-II 优化方法,根据评价特征值为个体分配非支配层以及拥挤度算子,经选择、交叉、变异后生成新的种群并建立相应的设计参数集;
- 5) 将更新后的设计参数传递给 ANSYS 进行有限元仿真计算,输出结果并重复第 4 步,直至达到种群迭代数,输出最优设计参数。

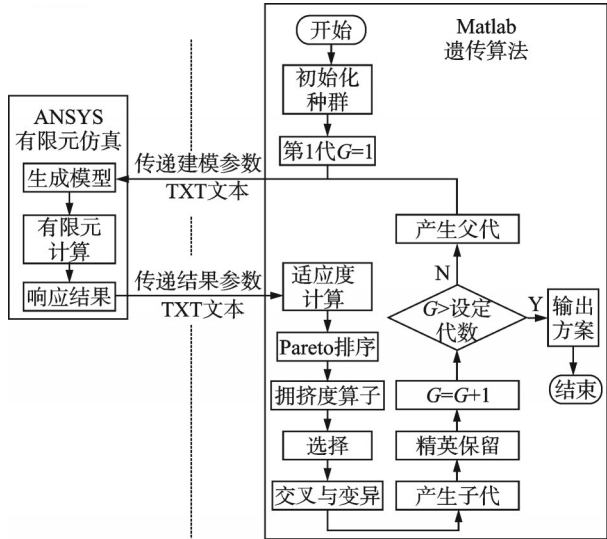


图2 Matlab-ANSYS联合仿真流程图
Fig.2 Flow chart of Matlab-ANSYS co-simulation

3 边界映射优化设计算例

3.1 模拟实际工况试验

以某发动机推力装置组件为研究对象,组件通

过支耳与舱体底板连接。为了模拟产品工作时的实际力学环境及其试验边界,设计了组件、底板以及上、下舱段等试验件,通过振动试验获得组件关注部位的振动响应作为实际工况下的组件响应。

推力装置组件试验件为薄壁圆柱形式,如图 3 所示。组件通过 3 个耳片孔与底板连接,上、下舱段在底板处对接,试件材料为 2A12 铝合金,模拟件通过下舱段与试验夹具连接后安装在振动台上进行试验。模拟试验安装图如图 4 所示。

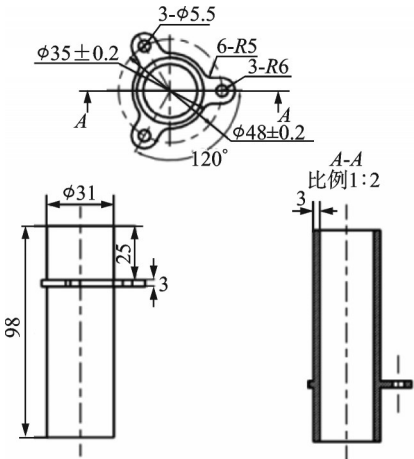


图3 推力装置组件试验件(单位:mm)
Fig.3 Thrust device test product (unit:mm)

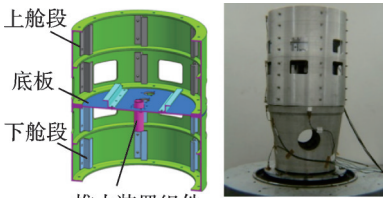


图4 模拟试验安装图
Fig.4 Installation diagram for simulation test

试验时,在组件及其安装面上布置 3 个加速度测点,分别开展正弦扫频试验和随机振动试验,其加速度测点响应曲线分别如图 5,6 所示。分析得出组件的前 3 阶主要特征频率为 336,773 和 1 039 Hz,从安装面(测点 A₃)到组件(测点 A₁和 A₂)的加速度均

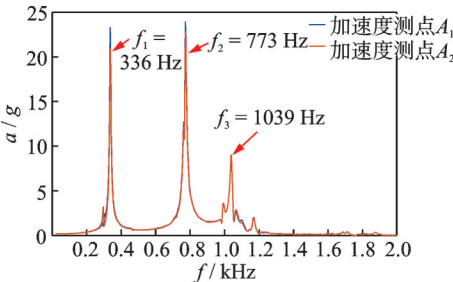


图5 正弦扫频试验加速度测点响应曲线
Fig.5 Response curve of acceleration measuring points in sine frequency sweep test

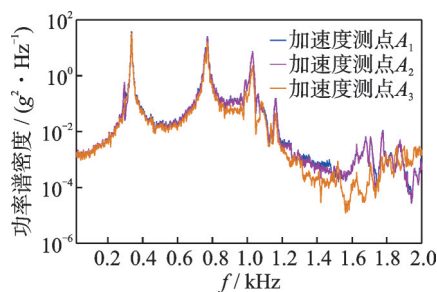


图6 随机振动试验加速度测点响应曲线

Fig.6 Response curve of acceleration measuring points in random vibration test

方根值(root mean square,简称 RMS)放大倍数分别为 1.27 和 1.21 倍。模拟实际工况试验结果见表 1。

表 1 模拟实际工况试验结果	
Tab.1 Test results under simulated actual conditions	
组件响应特征参数	数值
1 阶峰值频率/Hz	336
2 阶峰值频率/Hz	773
3 阶峰值频率/Hz	1 039
RMS 放大倍数($A_1:A_3$)	1.27
RMS 放大倍数($A_2:A_3$)	1.21

3.2 组件地面试验边界结构优化设计

对组件地面试验边界结构进行优化设计前,为保证结构具有充分的可设计性,兼顾其频率和响应特性,给定其初始结构形式为平板与矩形截面立柱的组合结构形式。试验时,组件通过螺栓安装于平板上,平板通过 4 条立柱与振动台连接,同时在平板底面布置质量块来调节系统特征频率^[23]。

使用 APDL 程序对推力装置组件和待优化的试验边界结构创建了仿真模型,通过模态分析获得系统固有频率,通过基础激励随机振动响应分析获得关注部位的加速度响应 RMS。初始结构的动力学仿真结果显示:①当组件置于平板中心时,受平板“中心上拱”的模态变形影响,RMS 放大倍率较大,需将组件偏置以削弱该模态的影响;②平板中心点的质量点可以有效减小模态的影响,组件两侧的质量点会影响特征频率;③峰值频率受模态变形节点影响,同频段的峰值频率个数小于系统特征频率个数。

优化目标设计参数见表 2。根据分析结果,并考虑实际安装尺寸要求,设定了试验边界约束结构设计变量参数范围。NSGA-II 遗传算法的控制参数如下:迭代数为 200,交叉率为 3%,变异率为 5%,种群个体数为 20,染色体编码长度为 16,初始种群由遗传算法随机生成。经过迭代优化后,获得试验

边界的设计变量参数及优化结果,如表 3 所示。

表 2 优化目标设计参数		
Tab.2 Optimization target design parameters		
参数	物理意义	Pareto 评价标准
f_1	1 阶峰值频率	$\pm 10\%$
f_2	2 阶峰值频率	
f_3	3 阶峰值频率	
RMS_1	$A_1:A_3$ 放大倍数	$\pm 3\text{ dB}$
RMS_2	$A_2:A_3$ 放大倍数	

表 3 设计变量参数及优化结果			
Tab.3 Design variable parameters and optimization results			
参数	物理意义	范围	优化结果
P_1	板的长度/mm	$300 < x < 400$	345.87
P_2	板的宽度/mm	$200 < y < 300$	252.95
P_3	板的厚度/mm	$10 < z < 15$	13.88
Q_1	柱腿边长/mm	$15 < a < 25$	17.01
Q_2	柱腿长度/mm	$100 < l < 150$	133.50
A_1	偏置距离/mm	$50 < e < 120$	100.32
M_1	质点 1 质量/g	$200 < m_1 < 500$	396.55
M_2	质点 2 质量/g	$200 < m_2 < 500$	412.85
M_3	质点 3 质量/g	$50 < m_3 < 300$	107.32

对优化后的最终试验边界结构及组件进行动力学仿真分析,地面试验结构仿真模型如图 7 所示。系统前 7 阶模态振型如图 8 所示。其中:第 1,2,4 阶模态主要变形方式是立柱在水平面内的扭转变形,该变形可忽略;第 5 阶模态中板面短边中线是模态变形节点,组件在节点的变形也可以忽略;组件的变形主要由第 3,6,7 阶模态变形提供,优化目标的前 3 阶峰值频率映射为系统的第 3,6,7 阶固有频率。笔者进行了随机振动响应分析,优化设计仿真结果见表 4。可以看出,优化设计满足目标要求。

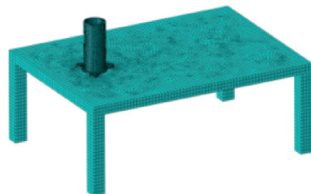


图7 地面试验结构仿真模型

Fig.7 Simulation model structure of ground test

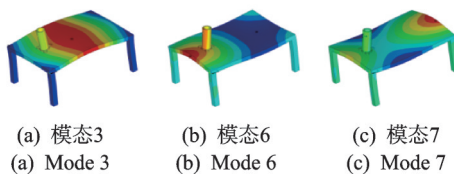


图8 系统前 7 阶模态振型

Fig.8 The first seven vibration modes of the system

表 4 优化设计仿真结果
Tab.4 Optimize design simulation results

优化目标	目标	优化设计 仿真结果	误差
1 阶峰值频率/Hz	336	347	3.42%
2 阶峰值频率/Hz	773	771	-0.16%
3 阶峰值频率/Hz	1 034	1 033	-0.02%
RMS 放大比 $A_1:A_3$	1.27	1.30	0.20 dB
RMS 放大比 $A_2:A_3$	1.21	1.22	0.07 dB

4 试验验证

为验证优化设计的试验边界结构满足组件响应一致性要求,对推力装置组件开展了边界映射工况的验证试验。验证试验安装如图 9 所示。

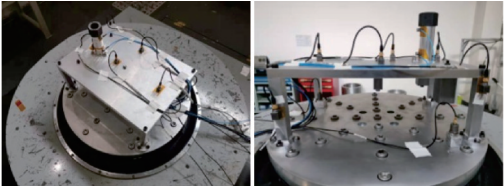


图 9 验证试验安装图
Fig.9 Installation status of verification test

4.1 试验项目及测点布置

试验项目包括正弦扫频试验和随机振动试验。正弦扫频试验频率范围为 20~2 000 Hz,激励量级为 0.5 g,扫描速率为 4 oct/min,通过正弦扫频试验获得组件的加速度幅频响应曲线和主要频率特征。随机振动试验的频率范围为 20~2 000 Hz,激励谱的谱型为平直谱,加速度均方根值 $G_{rms}=5.0\text{ g}$,试验时间为 1 min,通过随机振动试验获得组件的加速度响应放大倍数及振动传递特性等。

加速度试验测点布置如图 10 所示。其中: A_1 和 A_2 布置在组件上, A_3 布置在组件与平板的对接面处,位置分别与模拟实际工况试验的测点位置对应。

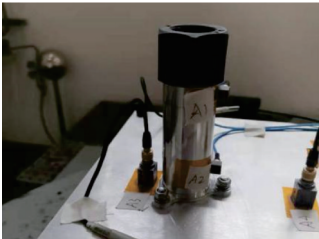


图 10 加速度测点布置
Fig.10 Arrangement of acceleration measurement points

4.2 试验结果讨论

测点 A_1 和 A_2 的正弦扫频响应对比曲线分别如

图 11,12 所示。可以看出,在试验频率范围内,边界映射工况的加速度幅值存在多个突频,前 3 阶主要特征频率分别为 318,776 和 948 Hz。与模拟实际工况的组件响应目标值相比,前 3 阶主要频率误差分别为 -5.34%,0.48% 和 -8.29%,满足误差 $\pm 10\%$ 的设计要求。

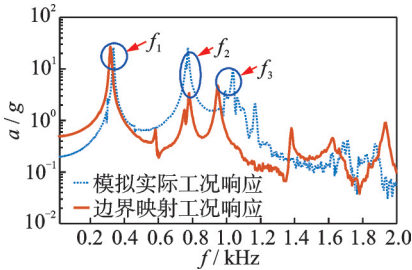


图 11 测点 A_1 的正弦扫频响应对比曲线
Fig.11 Comparison of swept sine response curves of measuring point A_1 under two test boundaries

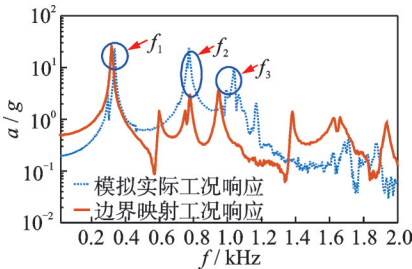


图 12 测点 A_2 的正弦扫频响应对比曲线
Fig.12 Comparison of swept sine response curves of measuring point A_2 under two test boundaries

测点 A_1 和 A_2 的随机振动响应对比曲线分别如图 13,14 所示。边界映射工况的测点 A_1 、 A_2 和 A_3 的加速度均方根值分别为 29.72 g,28.87 g 和 21.38 g。以 A_3 作为参考,测点 A_1 和 A_2 的加速度 RMS 分别放大 1.39 倍和 1.35 倍。与模拟实际工况的组件响应目标值相比,RMS 放大倍数的误差分别为 0.72 dB 和 0.95 dB,满足误差小于 $\pm 3\text{ dB}$ 的设计要求。从图 13,14 也可看出,两种工况的功率谱密度曲线在全频段内并不完全一致,这与本研究设定的优化目标有关。

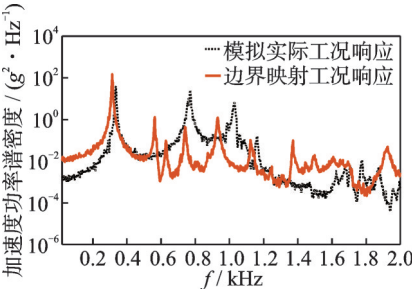


图 13 测点 A_1 的随机振动响应对比曲线
Fig.13 Comparison of random vibration response curves of measuring point A_1 under two test boundaries

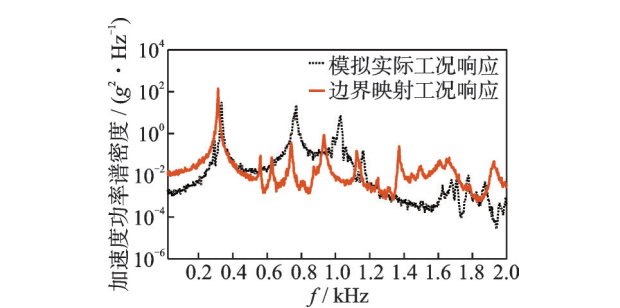


图 14 测点 A_2 的随机振动响应对比曲线

Fig.14 Comparison of random vibration response curves of measuring point A_2 under two test boundaries

试验验证结果见表 5。结果表明,地面试验与实际工况实现了特征频率与关注部位测点响应近似一致,试验边界约束结构设计有效,达到了发动机组件地面试验时的边界映射目标。

表 5 验证试验结果				
Tab.5 Verification test results				
优化目标	目标值	试验结果	误差	
1 阶峰值频率/Hz	336	318	-5.34%	
2 阶峰值频率/Hz	773	776	0.48%	
3 阶峰值频率/Hz	1 034	948	-8.29%	
RMS 放大比 $A_1:A_3$	1.27	1.39	0.72 dB	
RMS 放大比 $A_2:A_3$	1.21	1.35	0.95 dB	

5 结束语

为了实现发动机组件地面力学环境试验与实际工况的响应一致性,保证组件地面试验的有效性,进行了发动机组件地面试验边界约束结构设计研究,提出了以实现组件在两种力学环境下关键点响应近似一致为目标的试验边界约束优化设计方法。通过基于 NSGA-II 优化算法及有限元计算的联合仿真,获得了某发动机推力室组件地面试验边界约束结构的优化设计方案。试验验证结果表明,两种力学环境下,推力室组件响应的前 3 阶特征频率误差分别为 -5.34%, 0.48% 及 -8.29%, 测点加速度响应 RMS 比值误差为 0.72 dB 及 0.95 dB, 与仿真优化结果吻合良好,实现了优化设计目标,证明了所提边界映射优化求解方法的可行性及有效性。

参 考 文 献

[1] 苟仲秋, 闫鑫, 张柏楠, 等. 载人航天器地面试验验证体系研究[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(6): 528-534.
GOU Zhongqiu, YAN Xin, ZHANG Bainan, et al. The ground test validation system for manned spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35 (6) :

528-534.(in Chinese)

[2] 韩飞, 任全彬, 苏明慧. 工装约束下火箭舱段壳体的结构振动特性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(4): 726-732.
HAN Fei, REN Quanbin, SU Minghui. Study on parameter optimization of impact resistance of tunnel excavation trolley under central impact loads and its performance verification [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(4): 726-732.(in Chinese)

[3] ZHU S Y, ZHU L W. Role of base rotation in spacecraft vibration tests of dynamic flight environments [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, 54(4) : 979-983.

[4] 史超. 冲压发动机地面试验技术及试验能力述评[J]. 火箭推进, 2021, 47(1): 1-12.
SHI Chao. Review of ramjet ground-test facilities and relevant technology development [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(1): 1-12.(in Chinese)

[5] MA X T, TIAN K, LI H Q, et al. Diverse discrete material optimization for multi-patch laminates under vibration environment [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(4): 1905-1925.

[6] HAO D, ZHANG L, YU J, et al. Dynamic characteristics of multifunctional structure for spacecraft [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(2): 679-685.

[7] 杨正玺, 丁映婷, 汪阳丰, 等. 载荷映射用于航天器振动试验条件制定的方法[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(5): 934-940.
YANG Zhengxi, DING Dieting, WANG Yangfeng, et al. Application of load mapping method on specification determination in spacecraft vibration test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37 (5) : 934-940.(in Chinese)

[8] 王玫, 袁军社, 刘军彦, 等. 火箭二级发动机一级飞行段力学环境适应性评估方法[J]. 火箭推进, 2021, 47(4): 22-29.
WANG Mei, YUAN Junshe, LIU Junyan, et al. Evaluation method of mechanical environment adaptability for rocket second-stage engine in the first-stage flight phase [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(4) : 22-29.(in Chinese)

[9] OTT R J. Random vibration environment standard deviation variation verification for solid rocket motors [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, 54(2) : 471-475.

[10] YOU T W, ZHOU J S, GONG D, et al. Synthesis of random vibration environment spectra for the fatigue analysis and optimization of railway vehicles [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 159: 106752.

- [11] 路广霖, 罗亚军, 张希农, 等. 基于加权正则化的火箭发动机振动传递路径分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 271-276.
LU Guanglin, LUO Yajun, ZHANG Xinong, et al. Vibration transfer path analysis of rocket engine based on weighted regularization [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(9): 271-276. (in Chinese)
- [12] 阎桂荣, 董龙雷, 宋利强. 一种提高飞行器结构天地力学环境地面试验有效性的方法及其应用[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 10-16.
YAN Guirong, DONG Longlei, SONG Liqiang. A method and its application for improving the validity of ground testing of me-chanical environment's effects on aircraft structure [J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 10-16. (in Chinese)
- [13] 邹元杰, 朱卫红, 刘绍奎, 等. 基于冲击响应谱变换的星箭力学环境等效频谱影响因素分析[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(6): 609-614.
ZOU Yuanjie, ZHU Weihong, LIU Shaokui, et al. Analysis of the influencing factors of equivalent frequency spectra of mechanical environment for SC/LV interface based on shock response spectrum transformation [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(6): 609-614. (in Chinese)
- [14] WANG H Y, XIE H, LIU Q M, et al. Structural topology optimization of a stamping die made from high-strength steel sheet metal based on load mapping [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(2): 769-784.
- [15] 冯盟蛟, 张文胜, 次永伟, 等. 某航天阀门产品力学试验夹具研制与试验分析[J]. 环境技术, 2020(6): 203-210.
FENG Mengjiao, ZHANG Wensheng, CI Yongwei, et al. The development and experimental analysis of mechanical test fixture for a spaceflight valve product [J]. Environmental Technology, 2020(6): 203-210. (in Chinese)
- [16] 何石, 王龙, 张治君. 一种模拟动力学边界条件的环境振动试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(9): 76-80.
HE Shi, WANG Long, ZHANG Zhijun. Dynamic simulation of boundary conditions in environment vibration experiment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(9): 76-80. (in Chinese)
- [17] 顾松年, 姜节胜, 周苏枫. 柔性夹具与环境振动试验[J]. 机械强度, 2003, 25(2): 119-122.
GU Songnian, JIANG Jiesheng, ZHOU Sufeng. Flexible clamp and enviroment vibration expri-ment [J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(2): 119-122. (in Chinese)
- [18] 张玉梅, 韩增尧, 邹元杰. 随机振动环境下航天器结构强度设计方法综述[J]. 力学进展, 2012, 42(4): 464-471.
ZHANG Yumei, HAN Zengyao, ZOU Yuanjie. An overview of structural strength design methods for spacecrafts in random vibration environment [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(4): 464-471. (in Chinese)
- [19] 李西宁, 王悦舜, 李玉华, 等. 基于遗传算法的飞机弱刚性件夹持方案优化设计[J]. 航空制造技术, 2019, 62(1): 82-86, 94.
LI Xining, WANG Yueshun, LI Yuhua, et al. Optimization design of aircraft weak rigid parts clamping scheme based on genetic algorithm [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(1): 82-86, 94. (in Chinese)
- [20] 展铭, 郭勤涛, 岳林, 等. 使用应变模态和遗传算法的有限元模型修正方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 1081-1082.
ZHAN Ming, GUO Qintao, YUE Lin, et al. Finite element method updating using strain mode and genetic algorithm-based method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 1081-1082. (in Chinese)
- [21] 邹钰, 文永蓬, 纪忠辉, 等. 车轨耦合下钢轨复合吸振器的减振方法[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5): 888-896.
ZOU Yu, WEN Yongpeng, JI Zhonghui, et al. Vibration reduction method of rail composite shock absorber with vehicle track coupling [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(5): 888-896. (in Chinese)
- [22] RAO T B, RAO P C S, BAKI N. Multi-objective optimisation of friction stir welding parameters: integration of FEM and NSGA-II [J]. International Journal of Manufacturing Research, 2021, 16(1): 82-101.
- [23] HOSSAIN N, ISLAM M S, AHSHAN K H N, et al. Effects on natural frequency of a plate due to distributed and positional concentrated mass [J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(7): 3751-3759.



第一作者简介: 耿子强, 男, 1999年9月生, 硕士生、助理工程师。主要研究方向为起落架冲击动力学。

E-mail: 1415690053@qq.com