

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.016

基于噪声激励及响应和模态分析的风洞引射器结构优化设计

夏明主, 刘 奇

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 622661)

摘要: 为弄清噪声激励的大小、分布情况以及蒙皮响应(振动)的量值, 对 1.2 m 风洞引射器蒙皮噪声激励及响应测量实验和基于 Abaqus 软件模态进行优化设计。给出数据采集系统结构, 介绍具体测量方法, 并与现有结构(厚 5 mm)和优化设计方案(厚 8 mm)的有限元分析结果进行对比分析, 得到结构优化方案参考数据。结果表明: 该设计能有效避开气流脉动压力变化引起 400、409、460、516、561、598 Hz 的结构剧烈振动频率, 提高结构的刚度和强度, 提升增量引射器的抗疲劳性能。

关键词: 风洞; Abaqus; 噪声; 模态分析

中图分类号: TP311.1 **文献标志码:** A

Wind Tunnel Ejector Structural Optimization Design Based on Noise Excitation and Response and Modal Analysis

Xia Mingzhu, Liu Qi

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 622661, China)

Abstract: In order to find out the magnitude and distribution of noise excitation and the magnitude of skin response (vibration), the experiment of noise excitation and response measurement of ejector skin in 1.2 m wind tunnel and the optimization design based on Abaqus software mode were carried out. The structure of data acquisition system is given, measurement method is introduced, compared with the finite element analysis results of the existing structure (5 mm thick) and the optimized design scheme (8 mm thick). The reference data of structural optimization scheme are obtained. The results show that the design can effectively avoid the frequency of structure violent vibration caused by the change of air pulsation pressure: 400, 409, 460, 516, 561, 598 Hz, improve the rigidity and strength of the structure, improve the fatigue resistance of incremental ejector.

Keywords: wind tunnel; Abaqus; noise; modal analysis

0 引言

1.2 m 风洞增量引射器处于主气流与回流气流交汇处, 气流混合造成的气流脉动使引射器承受巨大振动。因 1.2 m 风洞是我国航空航天飞行器试验的主力风洞, 长期持续超负荷运行, 致使增量引射器在振动的交变作用下严重受损, 方圆节、支撑腹板、整流板等主要部件出现大面积裂纹。经多次反复补焊, 熔合区和过热区出现严重的晶粒粗化, 引射器母材严重渗碳、脆化。补焊的补丁、钢筋纵横交错于引射器表面, 改变了引射器光滑的外型面, 导致引射回主管道的气流品质下降, 增强了混合气流的脉动, 影响实验安全以及风洞流场品质^[1]。

在大修项目实施过程中, 笔者基于噪声激励及响应测量和 Abaqus 软件模态分析等手段^[2-3], 为设计和决策增量引射器结构优化方案提供数据支撑。

1 测量系统

图 1 为系统结构。传感器把脉动压力/加速度信号转换成电信号进入放大滤波模块, 经过放大和滤波后, 由采集模块采集, 采集的原始数据立即被存储到高速硬盘。所有硬件参数, 包括采样频率、采样长度、传感器桥压、放大倍数、滤波频率和系统校准等, 都由数据采集与控制软件设置。

2 测量方法

2.1 测点布置和测量参数

根据 1.2 m 风洞增量引射器结构, 拟布置多点脉动压力传感器及加速度计(如图 2), 每点同时测量脉动压力及加速度响应。测量参数包括实验段流场参数: Ma (马赫数)、 p_0 (总压)、 q (速压); 增量引射器测点处蒙皮振动(加速度及主频)。

收稿日期: 2020-06-20; 修回日期: 2020-07-22

作者简介: 夏明主(1972—), 男, 四川人, 学士, 高级工程师, 从事风洞机械结构设计研究。E-mail: 272284448@qq.com。

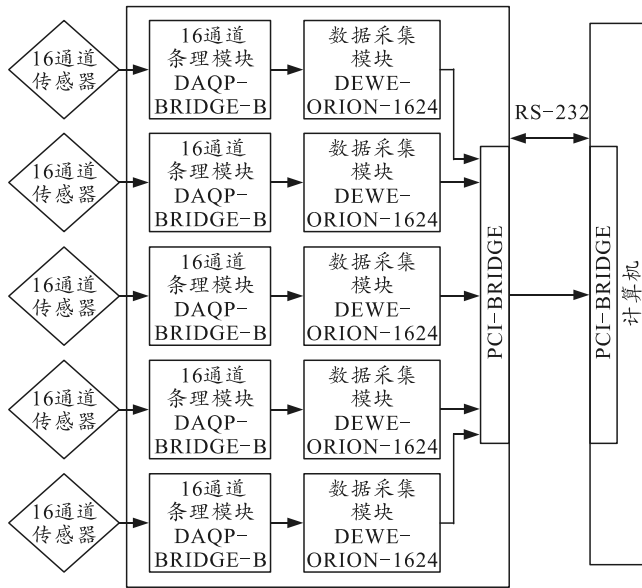


图 1 数据采集系统结构

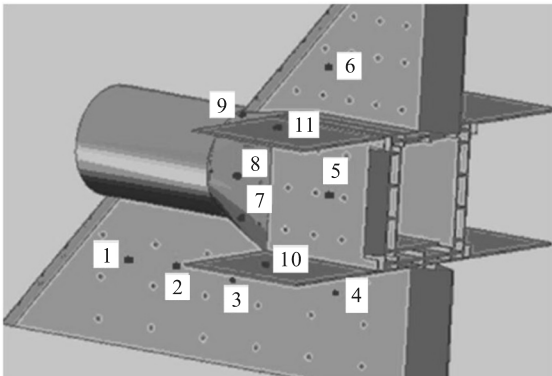


图 2 增量引射器测点布置

2.2 实验状态

考虑到 1.2 m 风洞增量引射器工作状态，在亚跨声速时，引射器其开度一般固定在 140，超声速状态时为全关，制定如表 1 的车次，其目的在于：

- 1) 对比亚跨声速增量引射器在不同前室总压下的气流激励及蒙皮振动；
- 2) 考察超声速时增量引射器关闭条件下的气流激励及蒙皮振动；
- 3) 评估以上工况的气流激励及蒙皮振动特性。

表 1 实验状态车次

<i>Ma</i>	p_0/kPa	车次	<i>Ma</i>	p_0/kPa	车次
0.85	120, 180, 240	3	1.78	150	1
1.00	130, 195, 260	3	2.00	220	1
1.50	130	1			

2.3 测量数据处理方法

实验时记录各测点的脉动压力、加速度时间历

程，数据采样频率为 20 kHz，截止频率为 10 kHz，每个实验连续采集。

脉动压力/加速度是随时间变化的随机信号，不可能用一个值来表示其特性，必须从幅值域、频率域用概率论和统计方法来描述；因此，其数据处理要比常规测量复杂得多。完整描述脉动压力/加速度特性的统计函数很多，笔者只列出本项实验所涉及的计算参数^[4]：

1) 均方根值

$$p_{rms} = \lim_{T \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1)$$

式中： $p(t)$ 为随时间变化的脉动压力/加速度信号，Pa； T 为测量时间，s。

2) 概率密度

$$PDF = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta p} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_p}{T} \right] \quad (2)$$

式中： Δp 为压力增量，Pa； T_p 为在测量时间 T 内，脉动压力/加速度瞬时值落在 p 至 $p+\Delta p$ 范围内的总时间，s。

3 测量结果及分析

3.1 噪声激励及响应

为便于分析和研究，选取 $Ma=1.0$ 的跨声速状态和 $Ma=2.0$ 的超声速状态为典型研究对象。

$Ma=1.0, 2.0$ 时，测得各测点的频谱如图 3、图 4 所示。从图中可知：风洞在实验过程中，引射器结构产生较为剧烈振动且出现振动波峰较多的区间是在大于 400 Hz 的频率范围^[5]。

由于结构优化设计需要，振动测试实验主要关注增量引射器圆方过渡段及支撑腹板蒙皮的振动情况。根据测点在圆方过渡段上布置的位置，选取 3、6、7、8、10、11 号测点作为分析对象并提取其振动测试数据，得到上述测点的振动频谱分析^[6]如图 5 所示。由频谱分析图得知：在吹风过程中，3、6、7 号测点得到的振动波形图变化较大，且在不同频率区间多次出现幅值较大的振动波峰，根据测点布置的位置可知，引射器圆方过渡段蒙皮、上下支撑腹板蒙皮等结构振动较为剧烈，而在 8、10、11 号测得的振动波形图变化较小，说明该处结构振动相对较弱。

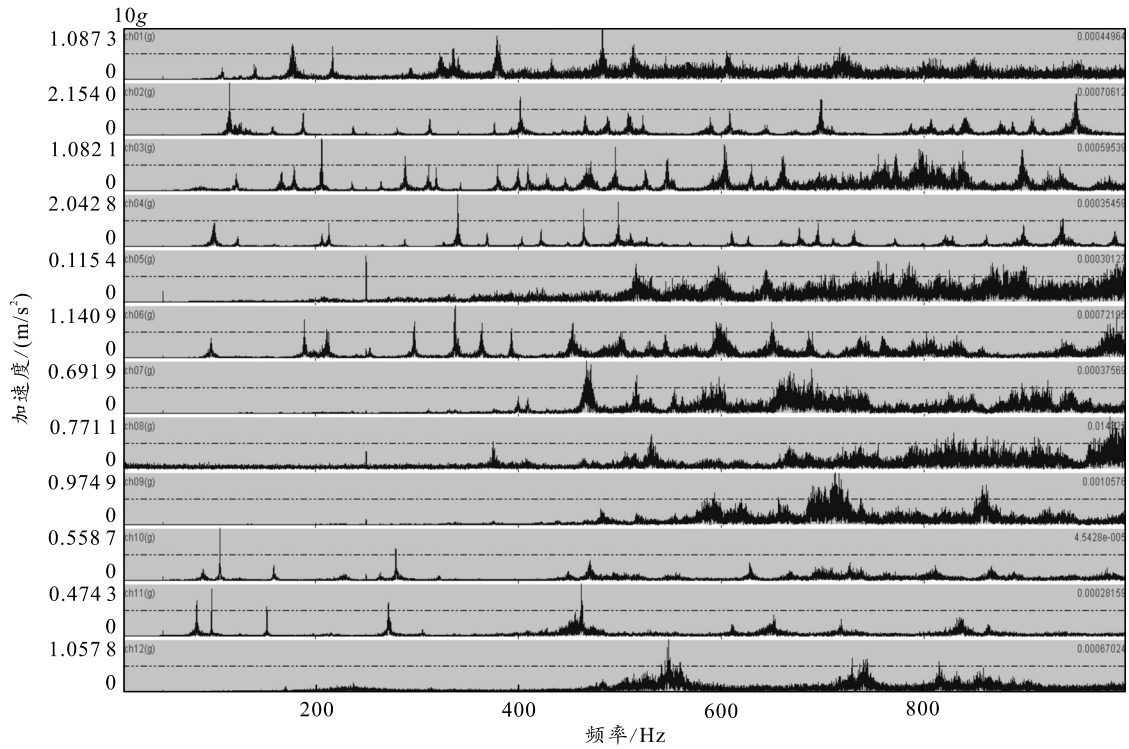


图 3 $Ma=1.0$ 各测点振动加速度频谱

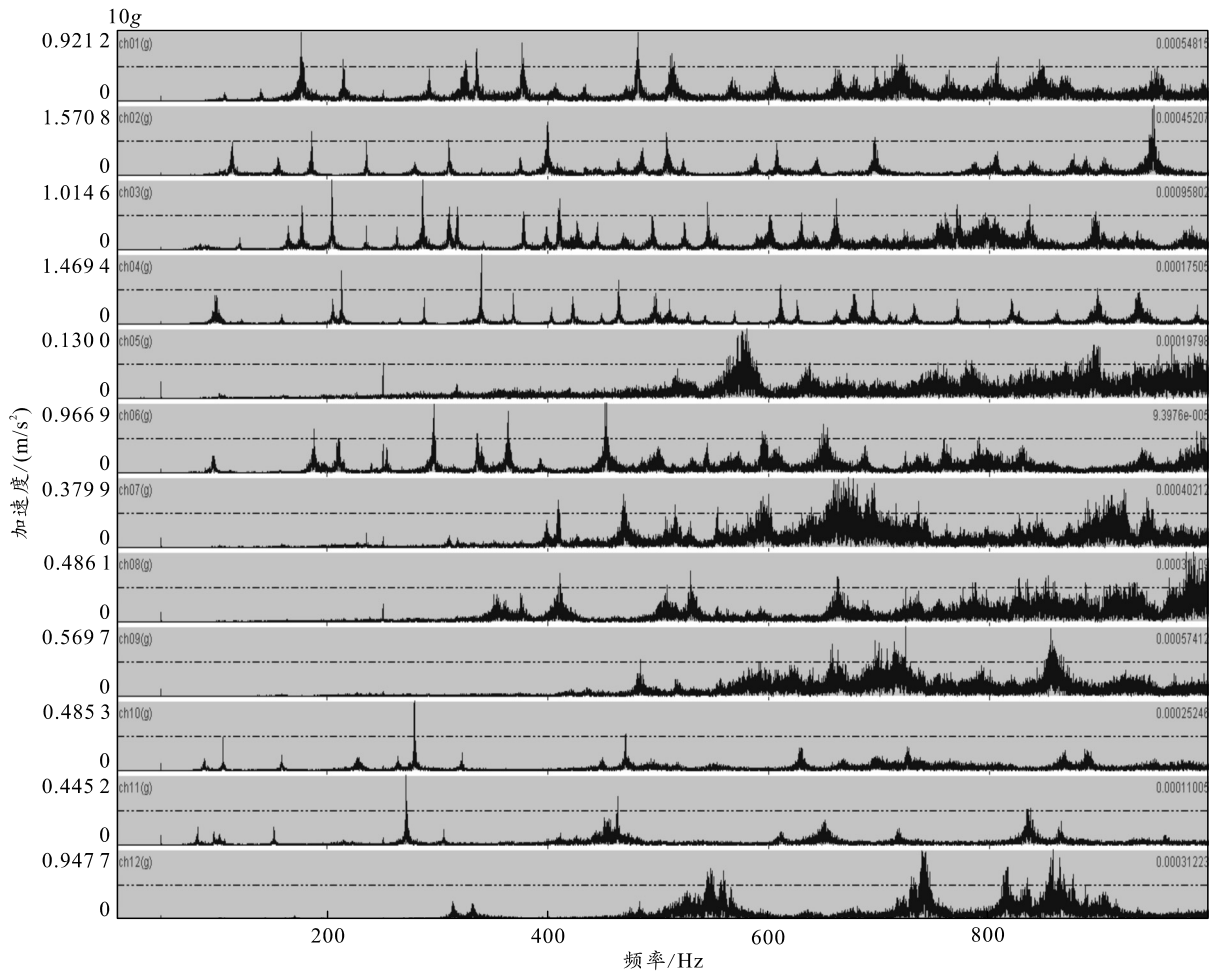


图 4 $Ma=2.0$ 各测点振动加速度频谱

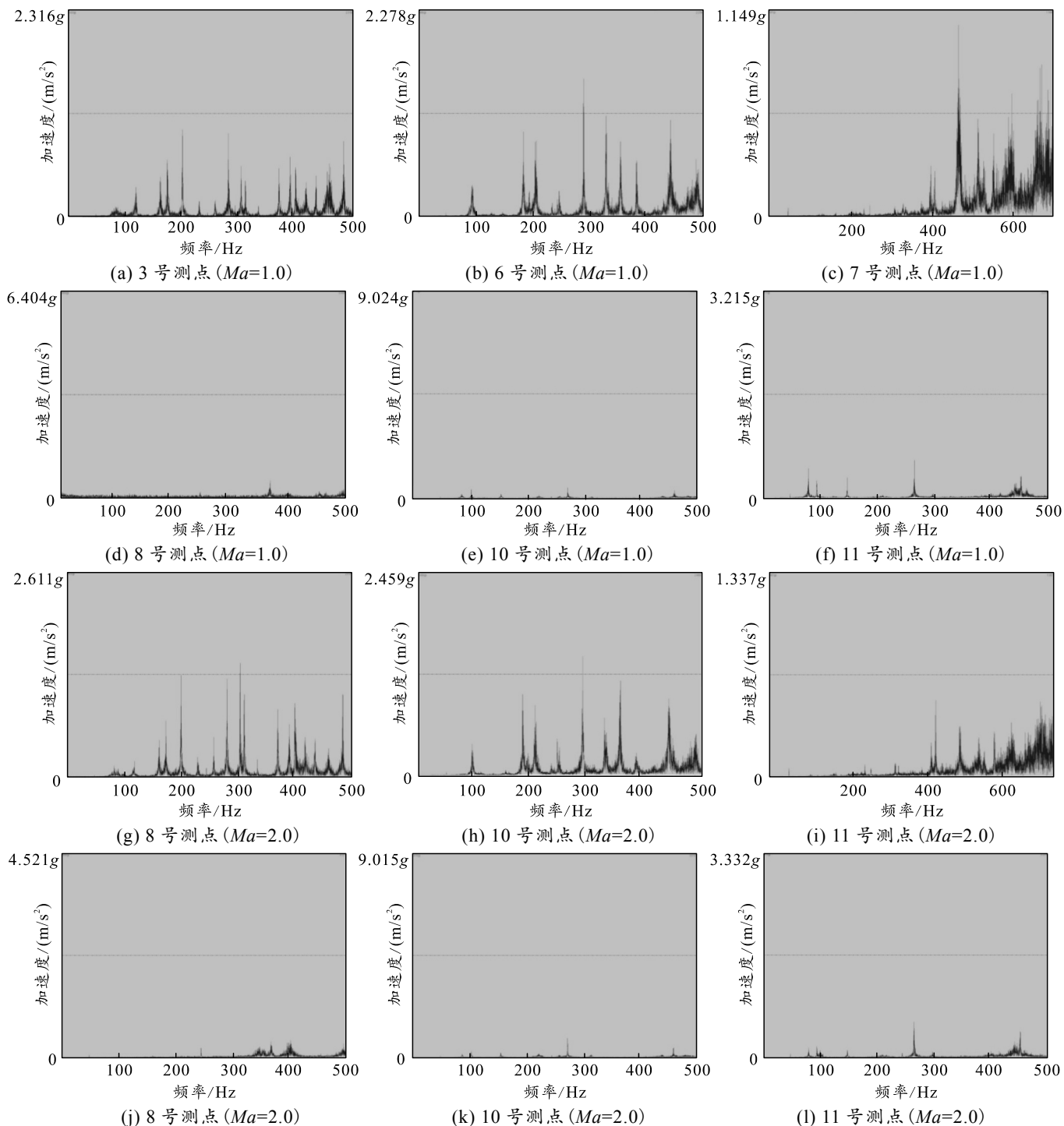


图 5 选取测点振动加速度频谱

提取各测点的数据可得：当 $Ma=1.0$ 时，频率在 204, 300, 349, 400, 469, 516, 561, 598 Hz 等附近，幅值出现较大的振动波峰；当 $Ma=2.0$ 时，频率为 289, 356, 399, 410, 470, 514, 554, 597 Hz 等附近的区间，峰值也出现较大振动。说明位于该处测点位置，气流脉动压力变化频率与结构振动固有频率较为接近，由此结构在气流冲击作用下会产生较为剧烈的振动。

3.2 基于 Abaqus 软件模态分析

基于 Abaqus 软件对现有风洞引射器圆方过渡段结构及其支撑系统进行了模态分析^[7]。以现有的增量引射器蒙皮 T 型肋板结构(如图 6)和优化改进后的工字型肋板结构(如图 7)分别作为振动分析对象，通过仿真计算得到不同结构的固有振动频率如表 2 所示。

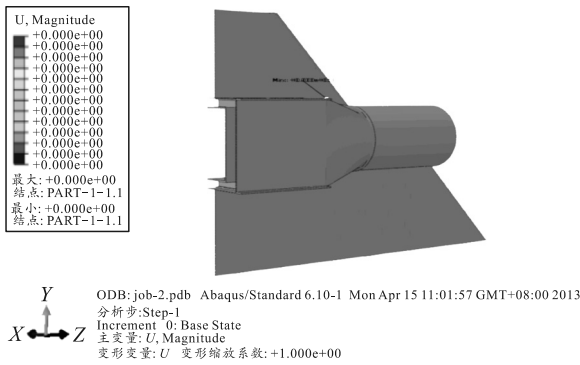


图 6 工字型肋板布置的振动模型

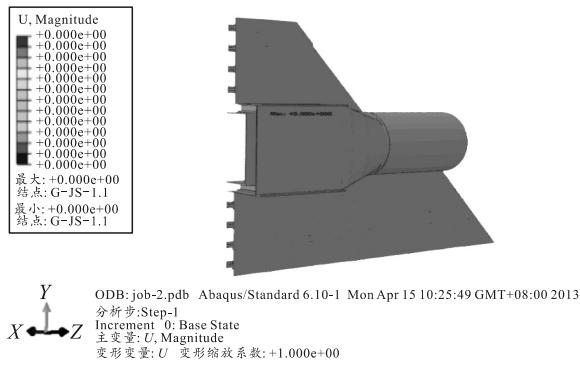


图 7 T 型肋板布置的振动模型

表 2 结构固有频率对比 Hz

振动阶数	T 型肋板结构固有频率	工字型肋板结构固有频率
1	372.8	476.2
2	408.7	577.4
3	454.0	625.4
4	507.9	667.7
5	593.6	691.6
6	630.1	788.4
7	631.7	882.0
8	648.7	905.4

3.3 优化方案

对比有限元分析与噪声激励和响应试验结果(如表 3、表 4 所示)可知:气流变化引起结构剧烈振动时,测点的频率与现有引射器蒙皮结构的固有频率较为接近,说明现有引射器结构在气体脉动压力作用下会产生较为剧烈的振动,由于蒙皮支撑结构的刚度较弱,振动进一步导致结构产生较大变形,在焊缝和连接不牢的位置易发生疲劳破坏。

表 3 $Ma=1.0$ 实验数据与仿真结果对比 Hz

T 型肋板结构固有频率	工字型肋板结构固有频率	实验测试振动峰值频率
372.8	476.2	400
408.7	577.4	409
454.0	625.4	460
507.9	667.7	516
593.6	691.6	561
630.1	788.4	598

表 4 $Ma=2.0$ 实验数据与仿真结果对比 Hz

T 型肋板结构固有频率	工字型肋板结构固有频率	实验测试振动峰值频率
372.8	476.2	399
408.7	577.4	410
454.0	625.4	470
507.9	667.7	514
593.6	691.6	554
630.1	788.4	597

4 结束语

基于噪声激励及响应测量和 Abaqus 软件模态分析结果,在 FL-24 风洞增量引射器大修项目实施过程中,采用了引射器蒙皮加厚(由原来的 5 mm 增至 8 mm),其支撑方式更改为工字型肋板,对增量引射器结构进行优化。结构的优化,有效避开了气流脉动压力变化引起结构剧烈振动的频率区间。同时,引射器蒙皮加厚和采用工字型肋板支撑方式增加了结构的质量和刚性,能相对提高结构的刚度和强度,提升增量引射器结构自身的抗疲劳性能。

FL-24 风洞增量引射器大修工作完成后,3 a 来经历了多期型号课题试验、1 万余次吹风试验的考验,仍然完好无损。从使用结果来看,结构优化效果显著^[8]。

参考文献:

- [1] 夏明主,王涛,董宾. 1.2 米×1.2 米风洞增量引射器大修实施方案[R]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心高速所,2013.
- [2] 沈彦杰,卜忱,杜希奇,等. 飞艇尾翼脉动压力特性试验研究[J]. 实验力学,2015,30(1):82-85.
- [3] 王惠方,魏浩. ABAQUS/Plug-ins 在炮声参数化建模及模态分析中的应用[J]. 兵工自动化,2013,32(10):91-93.
- [4] 方艳梅,刘永清. 数字信号处理[M]. 北京:电子工业出版社,2007:710-712.
- [5] 刘展. Abaqus 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:人民邮电业出版社,2015:513-535.
- [6] 解志军,张诣. 1.2 米风洞增量引射器蒙皮噪声激励及响应测量报告[R]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心第四研究所,2013.
- [7] 李勇,马东平,顾海涛,等. 一种改进的 FL-32 风洞双转轴角度测量方法[J]. 兵工自动化,2019,38(7):30-33.
- [8] 夏明主,刘奇,方亮,等. 1.2 m×1.2 m 风洞增量引射器大修总结报告[R]. 绵阳:中国空气动力研究与发展中心高速所,2016.