

基于虚拟统计能量法的运载火箭声振环境预示

王英诚¹,杨浩亮¹,杨毅强²,周泽³

(1. 北京中科宇航技术有限公司,北京 100176;

2. 中国科学院力学研究所,北京 100089;

3. 海克斯康制造智能设计与工程业务单元,北京 100089)

摘要:运载火箭在飞行过程中要面临复杂且恶劣的力学环境,其中跨声速段引起的声致振动最为严酷,因此准确预示跨声速火箭声振环境是火箭研制成功的重要基础之一。噪声试验是准确预示运载火箭声振环境有效的方法,但不利于研制早期阶段暴露潜在的力学风险。为此,研究将基于虚拟统计能量法应用于运载火箭声振环境预示,通过对比某运载火箭舱段噪声试验试验结果和虚拟统计能量法的仿真预示结果,证明了虚拟统计能量法可实现全频域的运载火箭声振环境预示。

关键词:统计能量分析;运载火箭;噪声试验;环境预示

中图分类号:V448.15+3 文献标识码:B

Prediction of Acoustic and Vibration Environment for Launch Vehicles Based on Virtual Statistical Energy Analysis

WANG Ying-cheng¹, YANG Hao-liang¹, YANG Yi-Qiang², ZHOU Ze³

(1. Beijing Zhongke Aerospace Technology Co. LtdC, Beijing 100176, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089, China;

3. Hexagon Manufacturing Intelligence Division, Design and Engineering Business Unit, Beijing 100089, China)

ABSTRACT:DCarrier rockets face complex and harsh mechanical environments during flight, with the most severe acoustic vibrations caused by the transonic segment. Therefore, accurately predicting the acoustic and vibration environment of transonic rockets is one of the important foundations for successful rocket development. Noise test is an effective method to accurately predict the sound and vibration environment of carrier rocket, but it is not conducive to expose the potential mechanical risks in the early stage of development. For this reason, the study applied the virtual statistical energy method to the sound and vibration environment prediction of carrier rocket. By comparing the experimental results of a carrier rocket cabin noise test with the simulation prediction results of the virtual statistical energy method, it was proved that the virtual statistical energy method could realize the acoustic environment prediction of carrier rocket in the full frequency domain.

KEYWORDS:Statistical energy analysis; Carrier rocket; Noise test; Environmental prediction

1 引言

运载火箭在飞行过程中受到严酷的力学环境,包括起飞阶段的喷流噪声和跨声速段的气动噪声。运载火箭主要结构为薄壳结构,是典型的声敏感结构,噪声作用在箭体的壳体上容易产生振动,并通过箭体结构传递到箭上各系统。运载火箭的结构复杂形式多样性,既有承力结构,又有柔性结构,是典型的刚柔组合体,开展全频段声振环境预示较为

困难。

2008年,NASA Glenn Research Center^[1]对 ACTS 卫星天线噪声试验进行了预示^[1],获取了0-500Hz的振动响应。大部分预示位置与试验结果吻合较好,文章明确指出统计能量分析法是预示高频声振响应的必要手段。2010年,Boeing公司与NASA联合完成了Ares 1X混合方法建模以及飞行试验的仿真分析^[2],建立了火箭的全箭SEA和FE-SEA混合模型,对遥测传感器位置处的随机振动进行了预示,遥测结果显示发现FE-SEA法的预示结果要远好于SEA模型预示结果。Thales Alenia^[3]使用虚拟统计能量分析法预示航天器的

收稿日期:2022-06-13 修回日期:2022-10-12

中高频动力学响应,验证了虚拟统计能量分析法在工程实践中的有效性。

在国内,晏廷飞等^[4]针对某天线开展了声振联合试验与单项环境试验的对比研究,研究了天线的声振联合试验效应。刘时秀^[5]应用 FE-SEA 法分析计算某仪器舱的声振响应,邹元杰等^[6]采用 FE-SEA 混合方法研究了振动和噪声联合激励下的整星响应并制定部组件的随机振动试验条件。

综上所述,目前国内针对运载火箭结构进行声振环境预示的工作开展较少,且多使用有限元法和有限元-统计能量分析方法,较少采用虚拟统计能力分析方。

本文首先对统计能量分析和虚拟统计能量分析方法进行了介绍,并通过实际案例介绍该方法在运载火箭研制中的工程应用。

2 统计能量分析法原理

2.1 统计能量分析理论

本节介绍了统计能量分析法(Statistical Energy Analysis, SEA)在,统计能量分析法基于功率流平衡方程建模^[7]

$$P_{i\text{in}} = \omega_c E_i \eta_{ii} + \sum_{j \neq i}^N \omega_c (\eta_{ij} E_i - \eta_{ji} E_j) \quad (1)$$

式中, $P_{i\text{in}}$ 为输入功率, ω 为圆频率, η_{ii} 为阻尼损耗因子, η_{ij} 为子系统*i*和*j*之间的耦合损耗因子, E_i 为子系统*i*的能量, E_j 为子系统*j*的能量。子系统之间的功率流平衡方程表征动能的传递。与热力学相似,子系统之间存在互易性关系,具体表达如下

$$n_i \eta_{ij} = n_j \eta_{ji} \quad (2)$$

式中, n_i 和 n_j 为子系统*i*和*j*的模式密度。

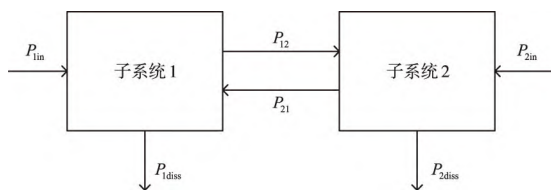


图1 二子系统模型

获取功率流平衡方程中的阻尼损耗因子和耦合损耗因子等获取统计能量分析参数主要有以下方法:

- 1)解析统计能量分析法:基于理论公式或经验公式获取统计能量分析参数;
- 2)试验统计能量分析法:基于功率输入法试验获取统计能量分析参数;
- 3)虚拟统计能量分析法:基于有限元仿真开展功率输入法虚拟试验获取统计能量分析参数。

2.2 解析统计能量分析法

解析统计能量分析法根据经验确定子系统划分方案,各子系统的模式密度和耦合损耗因子可以通过理论模型(梁、平板、曲、声腔)和波速理论推导,基于数据库活经验公司定

义子系统的阻尼损耗因子。解析统计能量分析法的特点是损耗矩阵非满秩矩阵,但是模型简化对经验要求较高,统计能力分析参数的精度需要验证。

2.3 试验统计能量分析法

试验统计能量分析法是统计能量分析的重要方法,最为成熟的试验统计能量分析法基于功率输入法(PIM),仍以图1所示的二子系统模型为例,根据二子系统功率流平衡方程直接得到一个子系统受到激励作用下的功率流平衡方程

$$\omega \begin{bmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{E}_{11} \\ \bar{E}_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\Pi}_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\omega \begin{bmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{E}_{21} \\ \bar{E}_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \bar{\Pi}_2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

其中, \bar{E}_{ij} 为第*i*个子系统受到外部激励时,第*j*个子系统的平均响应能量。

将式(3)和(4)进行变形,可以得到

$$\omega \begin{bmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{21} \\ \bar{E}_{12} & \bar{E}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\Pi}_1 & 0 \\ 0 & \bar{\Pi}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对上式各子系统平均能量求输入功率归一化后可以得到

$$\omega \begin{bmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{E}_{11} & \tilde{E}_{21} \\ \tilde{E}_{12} & \tilde{E}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \tilde{E}_{ij} 为子系统*i*受到外部激励时,子系统*j*的归一化平均振动响应能量。

于是,对式(6)中能量归一化矩阵求逆即可得到二子系统的统计能量分析损耗因子参数矩阵

$$\begin{bmatrix} \eta_1 + \eta_{12} & -\eta_{21} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \eta_{21} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{E}_{11} & \tilde{E}_{21} \\ \tilde{E}_{12} & \tilde{E}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (7)$$

在实际工程中通过测量输入力和测点的响应速度可以得到各子系统对应的归一化能量,再利用式(7)既可以求得子系统之间的统计能量参数矩阵,与统计能量方法相同,PIM可直接扩展到多自由度子系统。

试验统计能量分析法是精度最高的统计能量理论应用方法,但也存在较大的应用限制,主要为试验统计能量分析法需要在实际产品或原理样机上需要开展试验,对于复杂系统试验的代价巨大,往往要耗时数周完成,在实际工程应用中限制较大。

针对解析统计能量分析法和试验统计能量分析法的缺点,近年来,虚拟统计能量分析被逐渐发展起来,该方法在实际工程的应用中具较大的优势。

2.4 虚拟统计能量分析法

虚拟统计能量法采用有限元仿真开展虚拟功率输入试

验。通过采用随机激励作用于子系统并获得各子系统的输入功率和能量,在此基础上基于功率输入法求出耦合损耗因子和阻尼损耗因子,理论过程与试验法一致(见式(3)-(7)),主要区别在于试验法的子系统和输入功率基于试验获取,虚拟统计能量基于有限元计算。

相比于解析统计能量分析法,虚拟统计能量分析法可在低频获取更精确的预示结果^[3],因为虚拟统计能量分析法可获取间接耦合损耗因子(指不直接相连的两个子系统之间的耦合损耗因子)。获取间接耦合损耗因子使虚拟统计能量分析法捕获到更为准确的低频动力学响应。但随着频率的上升,间接耦合因子对系统的影响将会降低。

虚拟统计能量分析法采用对偶模态法辨识流体和固体之间的耦合损耗因子,具体为 Maxit 和 Guyader^[9,10] 提出 SmEdA 方法,该方法基于一组模态应力与位移对偶模态方程,通过非标准的模态扩展,利用解耦子系统的模态去描述耦合系统的自由振动。该方法假设解耦受挡流体子系统的第 p 阶的应力模态振型为 σ_p ,解耦自由的固体子系统的第 q 阶位移模态振为 W_q 两个子系统之间的模态的相互作用功为

$$w_{pq} = \int_s W_q \sigma_p n dS \quad (8)$$

因此, S 是两个子系统之间的连接面, n 是法向的单位向量。

流体子系统和结构子系统之间的耦合损耗因子为分析频率带宽内的两个子系统之间的模态对的相互作用功的函数,可由下式得到

$$\eta_{12} = \frac{1}{N_1 \omega_c} \sum_{p=1}^{N_1} \sum_{q=1}^{N_2} \left[\frac{(w_{pq}) \left(\frac{\Delta_p \omega_q^2 + \Delta_q \omega_p^2}{\omega_p^2 M_p M_q \left((\omega_p^2 - \omega_q^2)^2 + (\Delta_p + \Delta_q) (\Delta_p \omega_q^2 + \Delta_q \omega_p^2) \right)} \right)} \right] \quad (9)$$

式中, ω_c 是分析频率带宽中心角频率, N_1 、 N_2 表示两个子系统在分析频率带宽内的共振模态的阶数, ω_p 、 ω_q 是子系统的模态角频率, Δ_p 、 Δ_q 是模态阻尼带宽, M_p 、 M_q 是模态 p 、 q 的模态质量。

SmEdA 方法求耦合损耗因子依赖于两个子系统之间的连接面的模态应力与位移积分得到,这以为这 SmEdA 方法主要用于定义流体和固体子系统之间的耦合损耗因子。

相比试验统计能量分析法,虚拟统计能量分析则相对容易实现参数辨识,不需要通过开展复杂且长周期的输入功率法试验辨识统计能量参数,仅需要基于有限元计算获取功率流平衡方程输入功率法。

3 工程应用

3.1 概述

北京中科技技术探索有限公司研制团队应用虚拟统计能量分析方法针对所某运载火箭的舱段的噪声试验进行了仿真预示,该运载火箭的重要单机设备均布置在该舱段。在研

制初期,针对舱段进行噪声激励下的振动环境预示可提前暴露结构的薄弱环节并优化,避免潜在的环境风险和反复试验造成的经济与周期损失。



图2 舱段组合体噪声试验

3.2 噪声载荷谱获取

基于虚拟统计能量分析方法的运载火箭声振环境预示所采用的噪声激励载荷谱与试验条件相同,针对新研制的运载火箭型号,火箭研制团队基于图3所示风洞脉动压力试验与CFD 仿真得到了运载火箭在飞行过程中的气动噪声载荷谱(见表1),该载荷谱作为噪声试验的试验条件。



图3 舱段组合体噪声试验

表1 气动噪声载荷谱

1/3 倍频程中心频率	声压级谱	1/3 倍频程中心频率	声压级谱
Hz	dB	Hz	dB
25	119.4	500	143.4
31.5	121	630	145.0
40	126.4	800	146.8
50	137.3	1000	146.0
63	137.5	1250	143.5
80	137.9	1600	138.5
100	138.0	2000	134.4
125	138.3	2500	133.5
160	138.8	3150	129.8
200	139.2	4000	127.7
250	142.6	5000	128.2
315	143.5	6300	127.6
400	145.1	8000	125.1
25	119.4	500	143.4

3.3 仿真建模

北京中科宇航技术探索有限公司在舱段组合体的噪声试验前,应用虚拟统计能量法预示舱段组合体的声振环境响应。舱段组合体有限元模型如图4和图5所示,舱段组合体的内部对应设备支架上均建立了质量点模拟设备真实质量效应,舱段组合体有限元模型单元总数268900网格,在710Hz以内的模态总数为531,在2000Hz以内的模态总数为3120个。在分析时,在有限元分析软件中提取振则模态参数,并将模态参数导入到虚拟统计能量分析软件Actran中,在软件中完成虚拟功率输入法试验获取统计能量分析参数并完成噪声激励加载。



图4 有限元模型



图5 内部结构设备有限元模型

噪声激励条件如表1所示,在采用虚拟统计能量法进行激励加载时,需要将噪声载荷逆变换回功率谱密度,功率谱密度的单位为 Pa^2/Hz ,转化公式见式(10)。

$$PSD_{\text{Pa}^2/\text{Hz}} = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} p_{\text{ref}}^2 10^{\frac{SPL_{[dB/1/3oct]}}{10}} \quad (10)$$

其中, f_{\max} 为分析带宽的上限频率, f_{\min} 为分析频率的下限频率, p_{ref}^2 为参考声压平方, $SPL_{[dB/1/3oct]}$ 是三分之一倍频程的 dB 形式。才采用虚拟统计能量分析方法时,上述 PSD 将会转化为作用子系统的输入功率。

虚拟统计能量分析法的运载火箭舱段组合体所采用的振则模态采用有限元分析计算并导入 Actran。在 Actran 中,需要对单元进行重新编组,定义为子系统。定义子系统的过程可以根据经验手动划分或根据软件基于模态自动划分。

北京中科宇航技术有限公司研制团队建立如图6所示的一个包括37个手动定义的子系统的运载火箭舱段虚拟统

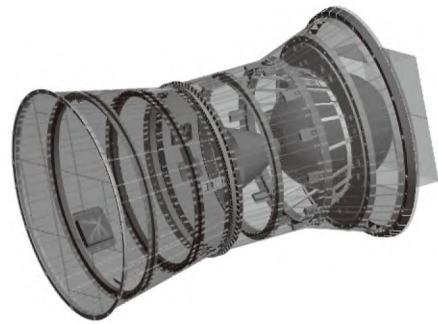


图6 运载火箭舱段虚拟统计能量分析模型

计能量分析模型。采用虚拟输入功率法计算耦合损耗因子和阻尼损耗因子。在此基础上,在舱段上施加如表1所示混响声场。

阻尼损耗因子是频率相关的,为了提高预示的准确度,研制团队针对典型的铝合金和碳纤维蜂窝夹层板结构,开展了试验辨识,获取图5所示的阻尼损耗因子。利用该阻尼损耗因子对仿真模型进行修正

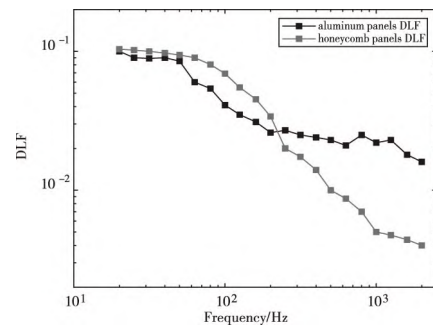


图7 铝合金板和蜂窝夹层板的阻尼损耗因子

3.4 响应提取

仿真结果将与试验的加速度测点响应进行对比,为此需要将虚拟统计能量分析法中的提取具体位置技术的响应,虚拟统计能量法基于均方模态权重函数的算法可提取子系统上的具体位置,该算法综合使用了统计能量分析结果和有限元局部模态结果,在工程上弥补统计能量法无法获取子系统上具体位置某响应的缺点。在获取加速时,需要将虚拟统计能量分析子系统的能量转化成加速度,具体的转化公式如式(9)所示。

$$a^2 = 2E_{\text{kin}}\omega^2/m \quad (11)$$

其中 E_{kin} 是子系统的动能, m 是子系统的质量, ω 为分析带宽中心频率。

3.5 仿真结果

火箭舱段组合体在噪声试验的关键测点如图8所示,这些测点布置在惯组支架安装处,飞控组合安装处,未修贮箱安装处和一体化组合安装处,分布在组合舱段的不同位置,

即火箭最为关注的测点,又是有效表征该舱段在噪声激励下的振动响应。

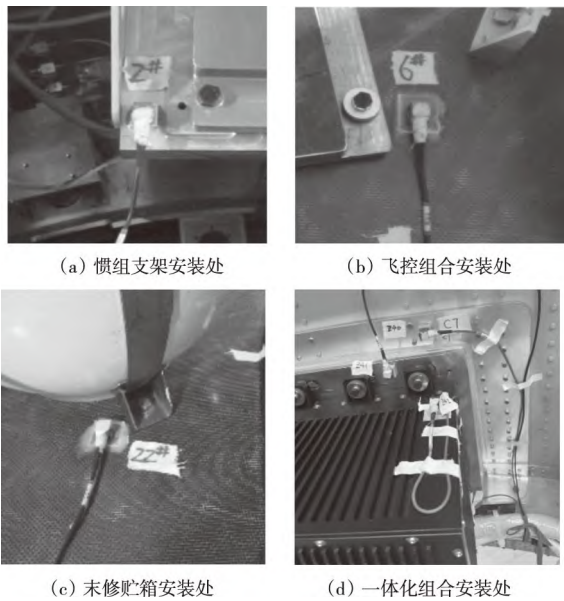


图8 铝合金板和蜂窝夹层板的阻尼损耗因子

采用有限元法、虚拟统计能量分析法预示的结果和试验结果如图9所示,有限元法的分析频率为5Hz-500Hz,虚拟统计能量分析法分析的频率为100-2000Hz。试验与分析对比结果显示,在100Hz-500Hz范围内,有限元法和虚拟统计能量分析法的预示结果均与试验结果吻合,并且有限元法和虚拟统计能量分析法吻合也较好,主要原因是虚拟统计能量分析法是基于有限元模态开展虚拟输入功率分析试验获取统计能量分析参数。

随着频率的上升,有限元的计算难度急剧加增,而虚拟统计能量法则可以轻松胜任,通过对比试验结果和分析结果,虚拟统计能量分析法可捕捉到具体响应的能量趋势,局部测点存在高频共振特征时,仿真结果与试验结果存在一定偏差,主要原因是虚拟统计能量分析法给出的子系统的响应是三分之一的平均带宽响应。整体看,虚拟统计能量法的预示结果与试验结果一致性较好,满足工程的应用要求。

4 结论

北京中科学航技术探索有限公司某运载火箭研制过程中采用虚拟统计能量法对舱段组合体噪声试验进行了仿真预示,通过仿真结果和试验对比可知,该方法可有效获取舱段组合体在噪声激励下的结构响应,预示精度达到工程应用要求,基于均方模态权重函数的算法可提取子系统上的具体位置,在工程上弥补统计能量法无法获取子系统上具体位置某响应的缺点。

虚拟统计能量分析模型可以扩展有限元模态结果至2000Hz,本次分析采用主频2.6Hz,18核处理器工作站,总计

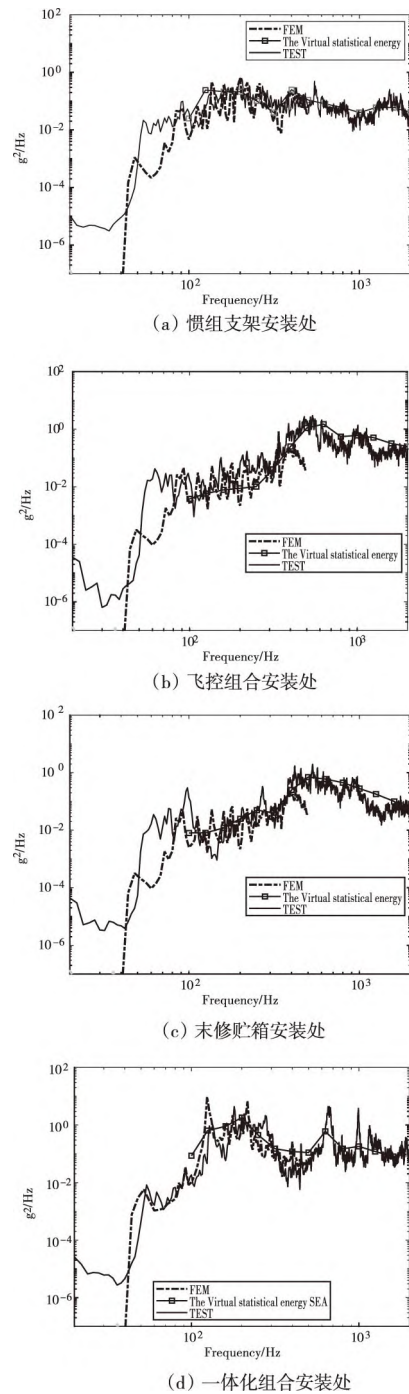


图9 仿真结果

算时间为4.6小时,相对较快,满足工程应用要求。

通过本文的计算结果可知虚拟统计能量分析法是快速且高精度的运载火箭声振环境预示方法,未来将根据火箭的飞行试验遥测数据结果验证采用虚拟统计能量分析预示运载火箭飞行过程中的声振环境的正确性。

(下转第294页)

参考文献:

- [1] 李佳,马建芬,张朝霞. 基于秘密分享和 SWT 的数字音频水印算法[J]. 计算机工程与设计,2022,43(3):616-623.
- [2] 陈阳,彭认灿,董箭,等. 面向电子航海图特征点角度构造的零水印算法[J]. 测绘科学,2021,46(11):141-146.
- [3] 姚明明,杜庆治. 基于范数的 DWT 域鲁棒音频水印算法[J]. 电视技术,2021,45(4):101-107.
- [4] 张秋余,许福久,赵振宇. 基于 DT-CWT 和 SVD 的鲁棒音频水印算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(9):23-29.
- [5] 刘正辉,张钰,秦兴红. 抗翻录攻击的鲁棒语音水印算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(2):303-308.
- [6] 汪梅,王将,李远成,等. 优化变分参数与改进小波软阈值重构滤波算法[J]. 西安科技大学学报,2022,42(2):380-388.
- [7] 邓春华,周勇. 小波检测的二次迭代修剪均值滤波算法[J]. 光学技术,2021,47(6):741-746.
- [8] 刘思玮,杜庆治,龙华,等. 一种基于二维码的鲁棒性音频水印[J]. 小型微型计算机系统,2022,43(7):1535-1540.
- [9] 齐燕博,杜庆治,龙华,等. 基于 SVR 的混合域鲁棒音频水印算法[J]. 电视技术,2022,46(2):14-20.
- [10] 姬传堂,章飞. 互质 MIMO 雷达的非圆信号降维 DOA 估计方

法[J]. 微波学报,2022,38(2):95-100.

- [11] 罗涛,李晨,田丽华,等. 基于双声道能量差值的 AAC 音频零水印算法[J]. 计算机工程与设计,2019,40(8):2140-2145.
- [12] 滕晓宇,桂小林,戴慧珺,等. 乱序局部敏感哈希音频零水印方案[J]. 西安交通大学学报,2019,53(9):110-119.
- [13] 包展恺,王中训,孟令增. 基于振荡的 LDPC 译码算法在数字水印中的应用[J]. 计算机应用与软件,2023,40(5):345-349.
- [14] 陶军,朱珍超,王昭悦,等. 一种面向 IPv6 网络空间的特征水印生成与嵌入方案研究[J]. 计算机研究与发展,2021,58(11):2400-2415.
- [15] 牛盼盼,杨思宇,王丽,等. 基于稳健特征点的平稳小波域数字水印算法[J]. 通信学报,2019,40(11):187-198.

[作者简介]



周瑞乾(1990-),女(汉族),河南信阳人,硕士研究生,讲师,研究方向:数字媒体技术。

王皓(1991-),男(汉族),山东枣庄人,硕士,工程师,研究方向:计算机信息管理、工程管理。

(上接第 54 页)

参考文献:

- [1] Jeffrey M Larko, Vincent Cotoni. Vibroacoustic response of the NASA ACTS spacecraft antenna to launch acoustic excitation[R]. NASA-TM-215168,2008.
- [2] Daniel Niedermaier, Mo Kaouk. Ares IX Hybrid modeling with comparisons to flight data[C]. ESI Japan users conference, Japan,2010.
- [3] Stefano Destefanis, Marina Bellini, Marina Bellini, Romain Baudson and Markus Brandstetter. Virtual statistical energy analysis Vibro-Acoustic Response Prediction of the IXV Space Hardware Exposed to Acoustic Diffuse Random Field, Thales Alenia Space - Italy, Strada Antica di Collegno 253, 10146 Torino, Italy.
- [4] 晏廷飞,张俊刚,方贵前,等. 某航天器天线声振组合环境试验与单项试验对比研究[J]. 航天器环境工程,2014,31(2):154-157.
- [5] 刘时秀. 应用 Hybrid FE-SEA 预示仪器舱动力学环境[J]. 强度与环境,2011,38(3):14-1.
- [6] 邹元杰,张瑾,韩增尧. 基于 FE-SEA 方法的卫星部组件随机振动条件研究[J]. 航天器环境工程,2010,27(4):456-461.
- [7] 姚德源,王其政. 统计能量分析及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.
- [8] Dande, Himanshu, et al. SEA Model Development for Cabin Noise Prediction of a Large Commercial Business Jet[C]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Vol. 254. No. 2. Institute of Noise Control Engineering,2017.

- [9] Martínez-Calvo B, et al. Development of FEM/BEM and SEA models from experimental results for structural elements with attached equipment. 2012:1-6.
- [10] Dande, Himanshu A., et al. Characterization of Aircraft Components for SEA Modeling[C]. INTERNOISE and NOISE - CON Congress,2012.
- [11] De Vivo A. VEGA Upper Composite Acoustic Test Correlation Activity by Actran software[C]. In FFT Acoustic Simulation Conference,2018.
- [12] Abdoly K, Brandstetter M, Binet D, Van Der Smissen L. Vibro-Acoustic Response Prediction of the Bartolomeo Multi-Purpose Payload[C]. In AEC (Aerospace Europe Conference),2020.
- [13] Sipos D, Brandstetter M, Guellec A, Jacqmo J, & Feszty D. Extended Solution of a Trimmed Vehicle Finite Element Model in the Mid-Frequency Range (No. 2020-01-1549). SAE Technical Paper,2020.

[作者简介]



王英诚(1989-),男(黎族),海南省屯昌人,硕士研究生,主要研究领域为运载火箭动力学仿真与试验技术。

杨浩亮(1987-),男(汉族),陕西西安人,博士研究生,主要研究领域为运载火箭总体设计。

杨毅强(1967-),男(汉族),山西省绛县人,博士研究生,主要研究领域为运载火箭总体设计。

周泽(1982-),男(汉族),北京市人,硕士研究生,主要研究领域为振动噪声与气动噪声仿真技术。