

能量有限元方法的双星整流罩中频声振环境预示

王怀志¹, 于开平¹, 曾耀祥², 王旭², 张宗强³

- (1. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001;
2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;
3. 西安航天动力测控技术研究所, 西安 710025)

摘要: 为了对某双星整流罩结构进行振动环境的预示, 采用能量有限元分析 (EFEA) 的方法, 建立了整流罩结构的能量有限元模型, 并对其进行了振动环境的预示。作为比较, 选取统计能量分析方法 (SEA), 建立了该整流罩的统计能量模型, 并与 EFEA 方法和实验测试结果进行了比较。结果表明, EFEA 方法与 SEA 方法的结果在一定的频段内可以较好地预示结构, 而且在该频段内, EFEA 方法的结果相对 SEA 方法更接近于实测值, 同时相比 SEA 方法, EFEA 可以得到预示结果的空间分布。

关键词: 能量有限元; 统计能量; 声振环境预示; 整流罩

中文图书分类号: V416.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2018) 05-0042-08

Prediction for Vibration Environment of the Double Stars Fairing Structure Based on Energy Finite Element

WANG Huaizhi¹, YU Kaiping¹, ZENG Yaoxiang², WANG Xu², ZHANG Zongqiang³

- (1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;
3. Xi'an Aerospace Propulsion Testing Technology Research Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to predict the vibration environment of a double stars fairing structure, this paper uses energy finite element analysis (EFEA) to establish the model of fairing structure, and its vibration environment is predicted. Then, the statistical energy analysis (SEA) method is selected and the statistical energy model of the fairing is established and compared with the EFEA method and the experimental results. The results show that the energy finite element method and the SEA method can well predict the vibration of the structure. Moreover, the results of the EFEA method are closer to the measured values than the SEA method, and the EFEA can obtain the spatial distribution of the predicted results compared to the SEA method in the frequency band.

Key words: Energy finite element; Statistical energy; Acoustic-vibration environment; Fairing structure

0 引言

飞行器在飞行过程中要受到各种复杂载荷作

用, 对于整流罩结构来说, 外部噪声 (尤其是中高频噪声) 对结构及内部有效载荷的影响很大, 如何对这种中高频噪声作用下的结构进行振动环

收稿日期: 2018-04-01; 修订日期: 2018-07-25

作者简介: 王怀志 (1990-), 男, 博士, 主要研究方向为结构振动环境预示方法。E-mail: feixue_whz@163.com

境预示是一个很重要的研究方向。

对于目前的振动环境预示来说，常用的有基于单元类的有限元（FEM）和边界元（BEM）方法，基于能量意义的统计能量方法（SEA）以及混合类方法。而能量有限元方法（EFEA）是近些年来出现的一种基于能量的，主要用于中高频振动环境预示的方法，它集合了单元类方法和能量类方法的优点，能够较好解决单元类方法在高频域带来的计算量问题，同时对结构的不确定性问题不敏感，相对于传统的能量类方法又能够考虑能量在结构上的分布。

EFEA 属于功率流类方法^[1]，Nefske 等^[2]最早基于波动理论建立了简单梁结构的能量密度控制方程。此后，能量有限元的研究经过较多的发展，目前在工程上已经有一定的应用，Zhang 等^[3]将能量有限元方法应用于某潜艇结构，Vlahopoulos 等^[4]对复合材料舱体结构进行了能量有限元分析，并与实验结果进行了比较，获得了较好的结果。在国内，孙丽萍等^[5]将能量有限元方法应用于某简化护卫舰的机座结构，徐福慧^[6]采用能量有限元方法对某齿轮箱结构的振动特性进行了研究，林毅^[7]对某导弹舱体结构进行了研究。EFEA 还有其他的一些应用，包括游进等^[8]对耦合板结构进行了研究，陈书明等^[9]对声腔和板耦合系统进行了研究，并与 SEA 和实测值进行了比较。

对于卫星整流罩结构，目前主要的研究采用统计能量分析方法，如孙目等^[10]采用 SEA 方法对某整流罩结构进行了噪声环境预示，王昆^[11]采用 SEA 方法研究了整流罩结构的声振特性，宋海洋等^[12]采用 SEA 方法对火箭整流罩的减振降噪问题进行了研究。此外，赵小见等^[13]采用有限元方法对整流罩结构在噪声下的腔内噪声分布进行了研究，但是其结果只在低频内有效，朱卫红等^[14]采用混合法（FE-SEA）对整流罩-卫星-仪器舱-适配器的组合体进行了预示，通过与实验数据比较验证了预示方法和结果的有效性。

综上所述，目前能量有限元方法在解决复杂问题，尤其是在航天领域的一些复杂结构的应用极少，且现有的应用都是将复杂结构简化为很简单少数板梁结构耦合系统，难以对更为复杂的结构如卫星整流罩结构进行预示。而传统采用的有限元方法无法解决中高频的预示问题，SEA 方法只能给出子结构的平均响应信息，即使是混合方

法（如 FE-SEA），对于声腔内部以及部分关注部位的响应也无法给出。

鉴于此，本文基于能量有限元方法，建立了双星整流罩的 EFEA 模型，并借助于 NASTRAN 的 EFEA 模块，对该复杂结构的动力学环境预示，并得到了符合预期的预示结果。

1 板的能量有限元理论

在稳态下，对于图 1 所示的单元体，其能量流平衡方程^[13]为式（1）。

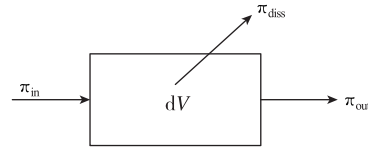


图 1 单元体的能量流

Fig. 1 The energy flow of the unit element

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\nabla q - \pi_{\text{diss}} + (\pi_{\text{in}} - \pi_{\text{out}}) \quad (1)$$

在式（1）中， e 表示结构的能量密度， q 表示功率流（单位时间内流经单位边界尺寸上的能量）， $\pi_{\text{diss}} = \eta\omega \langle e \rangle$ 表示结构损耗的能量， π_{in} 表示结构的输入能量， π_{out} 表示结构传递给其他系统的能量， $(\pi_{\text{in}} - \pi_{\text{out}})$ 表示单元体的净输入能量，对于没有能量交互的单系统来说，净输入能量为 π_{in} ，后文的公式推导主要对单系统来进行。

根据 Nefske 等^[2]的假设以及对梁^[14]和板^[15]的能量流关系的推导可知，能量密度与能量流的关系类似于热传导的关系，即

$$q = -\lambda \nabla (\kappa e) \quad (2)$$

其中，

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{C_g}{\eta\omega} \\ \kappa &= C_g \end{aligned} \quad (3)$$

式（3）中， η 为结构的内损耗因子， C_g 为结构的群速度，考虑稳态情况时 $\frac{\partial e}{\partial t} = 0$ ，这样可以得到板的能量密度平衡方程。

$$-\left(\frac{C_g^2}{\eta\omega}\right) \nabla^2 \langle e \rangle_{ff} + \eta\omega \langle e \rangle_{ff} = \pi_{\text{in}} \quad (4)$$

其中， $\langle e \rangle_{ff}$ 表示对能量密度进行空间和单个频率周期内做平均，根据 Galerkin 加权余量方法，可以得到能量有限元方法的方程。

$$[K^e] \{e^e\} + \{Q^e\} = \{F^e\} \quad (5)$$

假设权函数为 $N_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ，

$$[K_{ij}^e] = \frac{C_g^2}{\eta\omega} \iint_D \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dD + \eta\omega \iint_D N_i N_j dD \quad (6)$$

$$\{F^e\} = \iint_D \pi_{in} N_i dD \quad (7)$$

{Q^e} 代表了从单元边界上流出的能量。根据边界上的功率流平衡^[16]，可以得到

$$\{Q^e\} = [JC^e] \{e^e\} \quad (8)$$

其中，[JC^e] 的表达式为^[3]：

$$[JC^e] = \sum [I - \tau] [I + \tau]^{-1} \int_D N_i N_j dD \quad (9)$$

结构和声的能量密度与其均方根速度值满足以下关系：

$$e_s = \rho \langle v^2 \rangle$$

$$e_a = \frac{\langle p_e^2 \rangle}{\rho c_0^2} \quad (10)$$

式(10)中，e_s表示梁板结构的能量密度，⟨v²⟩表示对应结构的速度的均方值，e_a表示声腔的能量密度，p_e表示声压的有效值，⟨p_e²⟩表示声压有效值的均方值，c₀表示当前状态下的声速。

根据统计能量分析中关于统计平均的理论^[17]，速度与位移和加速度的均方值具有以下关系：

$$\langle d^2 \rangle = \frac{\langle v^2 \rangle}{\omega_n^2}$$

$$\langle a^2 \rangle = \omega_n^2 \langle v^2 \rangle \quad (11)$$

⟨d²⟩、⟨v²⟩和⟨a²⟩分别表示频带内位移、速度和加速度的均方值，ω_n表示频带中心频率对应的角频率。根据式(10)和式(11)可以通过能量密度得到带宽内位移、速度和加速度的均方值。

对于能量有限元方法的上限频率，可以由式(12)给出^[18]：

$$\frac{\eta\omega}{C_g} l \ll 1 \quad (12)$$

其中，l为结构的特征长度。

2 NASTRAN 中 EFEA 模块的应用

MSC. NASTRAN 的 EFEA 模块是目前可以使用的商用能量有限元方法模块，主要用来解决中高频域的复杂结构的振动、声振耦合等问题。该模块可以建立杆、梁、板、噪声单元以及相互之间的耦合，可以对复合材料、加筋结构进行建模，可以模拟结构吸声、焊点、接缝以及湍流边界等复杂特性。

利用 MSC. NASTRAN 进行 EFEA 分析主要

包括 5 个步骤 (如图 2 所示)：前处理 (建立有限元模型)、EFEA 预处理、能量有限元建模、EFEA 分析以及后处理。

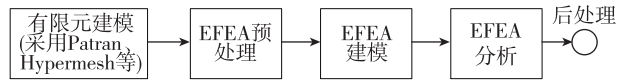


图 2 MSC. NASTRAN 进行 EFEA 分析流程

Fig. 2 MSC. NASTRAN EFEA analysis flow chart

建立有限元模型需要借助 MSC. PATRAN 或者 Hypermesh 等有限元建模软件，有限元模型建立以后，对于输出的 bdf 文件采用 pre-efea 模块进行前处理，可以得到处理后的文本格式的模型文件，在该模型文件的基础上进行 EFEA 建模，需要对结构的载荷、分析频带、材料、阻尼损耗因子等参数进行建模，并添加出控制等信息^[19-20]，已经完成的 EFEA 模型文件如图 3 所示。

```

1 $ EFEA Model Translated By Pre-EFEA
2 $
3 SUBCASE 1
4 FFWAVE 1322 0.001 1.21 343 3
5 FFWAVE 1960 0.001 1.21 343 3
6 FFWAVE 1963 0.001 1.21 343 3
7 FFWAVE 1965 0.001 1.21 343 3
8 FFWAVE 1967 0.001 1.21 343 3
9 ENDSUBCASE
10 $
11 FREQ 630 800 1000 1250 1600 2000 2500
12 $外带
13 PLATE 2 0.0288 2 1 10.33 12.12 0.0 1 0.0 0 0.0 0.0 0.0
14 $上盖
15 PLATE 3 0.008 1 1 3.26 3.26 0.0 1 0.0 0 0.0 0.0 0.0
16 $下盖
17 PLATE 4 0.008 1 1 3.26 3.26 0.0 1 0.0 0 0.0 0.0 0.0
18 $
19 $声腔
20 PACOUS 1 0.1210E+01 0.3430E+03 0.01 1
21 $
22 $铝
23 MELATE 1 0.7100E+11 0.2788E+04 0.3100E+00 0.01 .003 .003 1 1 1
24 $
25 $外壳
26 MAT12 2 5.836+9 5.836+9 1.093+9 0.3490 0 0 119.1782
27 2.163+9 8.928+8 7.430+8 1 1 1 2 2
28 $
29 $属性值
30 DTABLE 1 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
31 $损耗的阻尼损耗因子
32 DTABLE 2 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01
33 $耗密度
34 DTABLE 3 7.0247E-3 7.0247E-3 7.0247E-3 7.0247E-3 7.0247E-3 7.0247E-3
35 METHOD D
36 $
37 OUTFILE PUNCH PATRAN
38 OUTACS SEL E P
39 REFSPL 4.0E-10 1.42E5
40 $
41 $ Plate elements, nodes and POINT
42 GRID 1704 0.0 .435919-.446588
43 GRID 1705 0.0-.448333 .5561-2
44 GRID 1706 0.0-.420909-.882446
45 GRID 1707 0.0-1.24577-.782708
46 GRID 1708 0.0-.833072-.822270
47 GRID 1709 0.0-.410474-1.33803
48 GRID 1710 0.0-.791600-1.24056
49 GRID 1711 0.0-.4629-2-.451334
50 GRID 1712 0.0-.443445-.437483
51 GRID 1713 0.0-1.37123 .6007-2
    
```

图 3 进行 EFEA 分析的模型文件结构

Fig. 3 The structure of the EFEA model file

图 3 中给出了进行能量有限元分析的文本格式模型文件，模型需要定义载荷、分析频带、材料属性、损耗因子以及输出等几个部分，这与 VAOne 对 SEA 的建模具有很大的相似性。各种属性采用 NASTRAN 的卡片^[21-22]来指定，卡片参数的定义与 SEA 中的参数定义保持一致。

分析结果可以输出结构能量密度、均方根速度等，声腔的能量密度、声压的均方根以及声压级，结果文件可以直接输出文本、PUNCH 文件、Matlab 直接识别的 MAT 文件以及可以导入 PATRAN 进行后处理的文件（输出类型选 PATRAN）。

3 在整流罩结构中的应用

本文采用能量有限元方法对某双星整流罩结构进行了振动环境的预示，该结构示意图如图 4 所示。

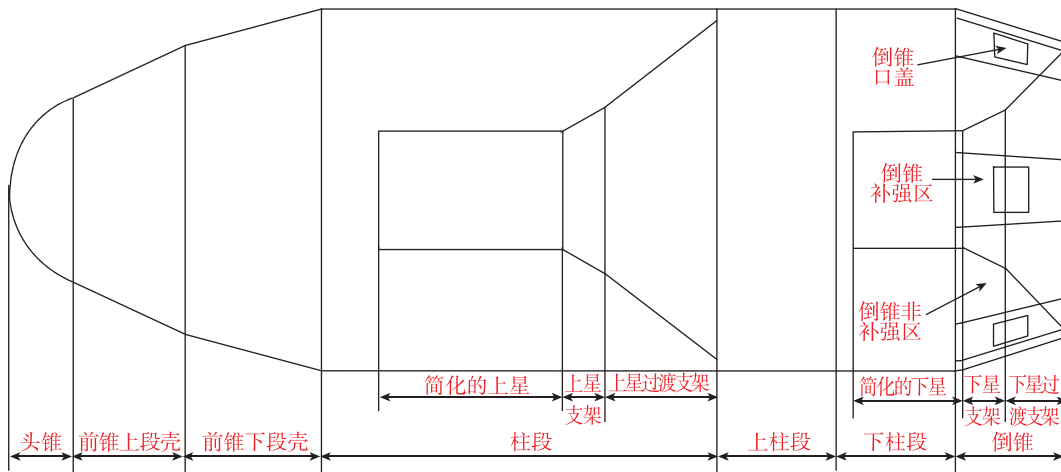


图 4 双星整流罩结构图

Fig. 4 The double stars fairing structure

图 4 中标注了双星整流罩的主要结构，各舱段之间的连接段有加强框（图 4 中未标注），上星支架、上星过渡支架和上星将整流罩结构分成两段。根据上述简化结构对该双星整流罩进行有限元建模，得到结构的有限元模型如图 5 所示。

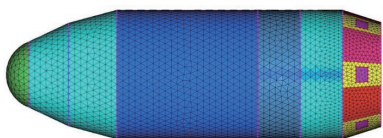


图 5 结构的能量有限元模型

Fig. 5 The EFEA model of the fairing

在建模的时候，壳体部分采用三角形单元，内部声腔采用了四面体单元，因为能量有限元模块要求壳体和声腔之间的单元节点耦合起来以方便在对应位置生成实体-壳之间的耦合连接，对于较复杂的结构划分成四面体单元和三角形单元较为容易。

考虑到在实验过程中，整流罩底部固定在基础上，下星支架、下星过渡支架和基础之间也构成一个小的声腔，所以该模型建模时实际上包含 3 个声腔。根据实际情况，需要对 3 个声腔进行建模。声腔的声压级是工程上非常关注的事项，也是本文动力学环境预示的一个主要内容。

在整流罩结构中，外部所有的壳体、上下卫

星支架以及上下卫星过渡支架为蜂窝夹心结构，对该结构的建模采用三明治夹心理论进行了简化，采用 EFEA 模块的夹层板单元属性进行建模。尾部倒锥部分为加筋板结构，采用 EFEA 的加筋板属性进行了相关的建模工作。

该整流罩结构置于外部声场中，通过对结构的能量传输关系进行分析，得到能量流传递路径，如图 6 所示。

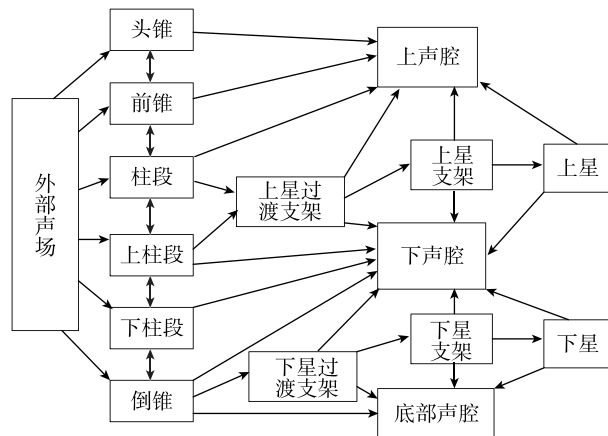


图 6 能量流传递路径

Fig. 6 The schematic diagram of the energy flow between subsystems

在能量传递的过程中，子系统本身还具有能量

的损耗,即结构的内损耗因子和耦合损耗因子部分。

然后分析整流罩结构的能量传输路径,从图6可以看出,能量主要通过外部壳体以及上下星支架和过渡支架部分传递到内部声腔,结构部分相互连接之间存在能量的交换,根据图6的能量传递关系,可以建立如图7所示的整流罩统计能量分析模型。

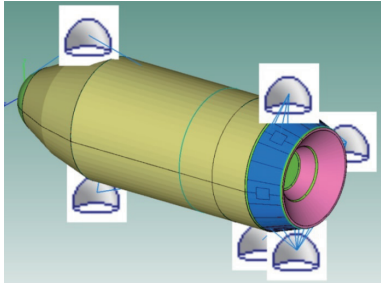


图7 双星整流罩 SEA 模型

Fig. 7 The SEA model of the fairing structure

根据该双星整流罩结构,考虑材料属性的差异,将该结构划分为70个统计能量子系统,其中有3个声腔子系统,7个半无限大声场,60个板壳子系统。半无限大声场与双星整流罩外部壳体部分连接,模拟外部壳体与外部声场之间的能量辐射,混响场激励采用VA One中的Diffuse Acoustic Field进行建模。

4 整流罩结构的 EFEA 分析

整流罩外壳受到混响场声压激励,其声压级(Sound Pressure Level, SPL)曲线如图8所示。

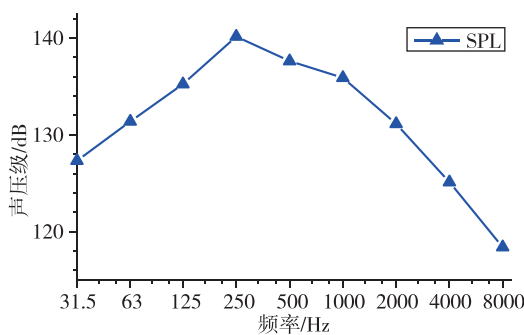


图8 整流罩声场的声压级曲线

Fig. 8 The SPL curve of the sound field

阻尼损耗因子一般情况下需要通过实验的方式测得,由于条件的限制,本文中的模型不能得到基于实验验证的阻尼损耗因子,文中结构的内损耗因子设置参考了文献[21]的公式。而耦合损耗因子则基于NASTRAN的EFEA模块和VA One分别自动计算得到。

对该整流罩结构进行EFEA分析,可以得到上下声腔的声压级响应结果,如图9~图12所示。

本文中的实测数据来源于对整流罩进行混响声场的实验。实验时,整流罩竖直置于混响场中心,底部由橡胶垫支撑,支撑垫的频率低于分析频率的下限。

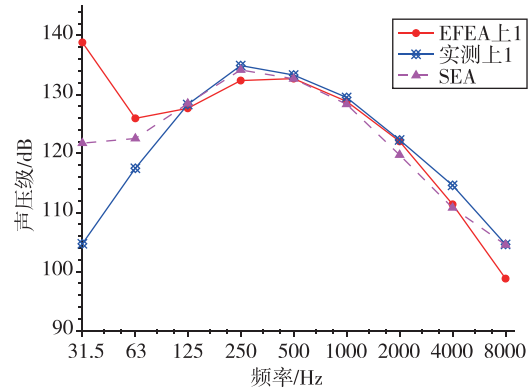


图9 上声腔上端声压级

Fig. 9 The SPL of the top of the upper cavity

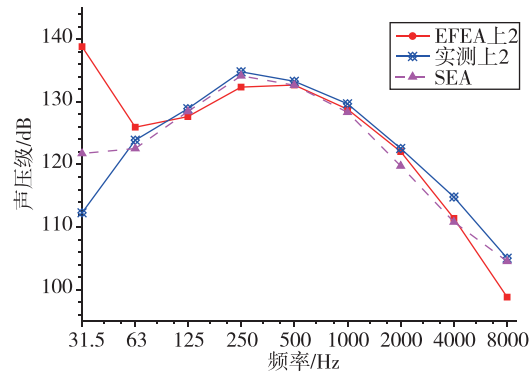


图10 上声腔下端声压级

Fig. 10 The SPL of the bottom of the upper cavity

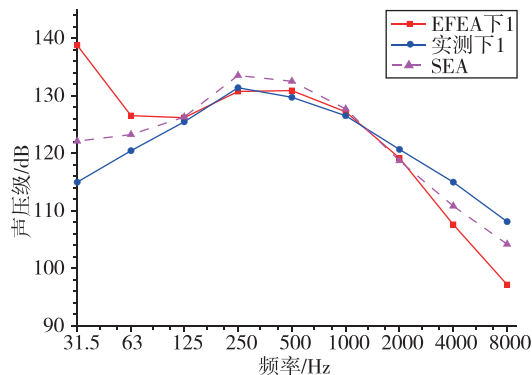


图11 下声腔上端声压级

Fig. 11 The SPL of the top of the lower cavity

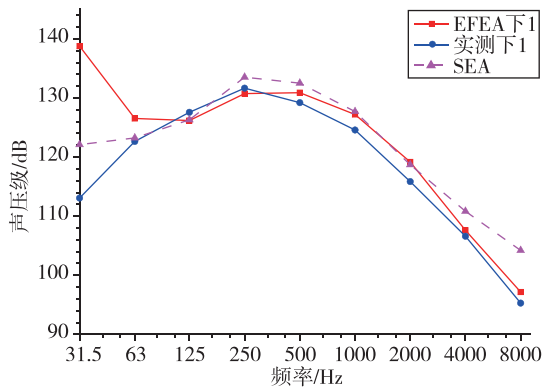


图 12 下声腔下端声压级

Fig. 12 The SPL of the top of the lower cavity

比较可以发现，在频率较低时，采用 SEA 和 EFEA 预示结果与实测值相差较大，在 125Hz~2000Hz 的频段内，EFEA 的预示结果与实测值相比误差基本小于 3dB，大于 2000Hz 时误差开始增大。本文模型及其仿真结果得到的 EFEA 方法更适合中频段的动力学环境预示问题，这与 EFEA 方法的理论以及之前的理论验证结果是相符的。

与实验值的比较可以发现，在低频段两种方法都出现了较大的误差。这是由于在低频时，子系统的模态叠合数 (Modal Overlap) 很小，而能量类方法采用了频带和空间上统计平均，其引入的误差会变得很大；在 125Hz~2000Hz 范围内，两种方法都得到了基本符合要求的预示结果，其中，能量有限元方法的结果与实测结果更为接近。

整流罩结构部分进行 EFEA 分析后，得到的 1000Hz 频段的均方根速度分布云图，如图 13 所示。

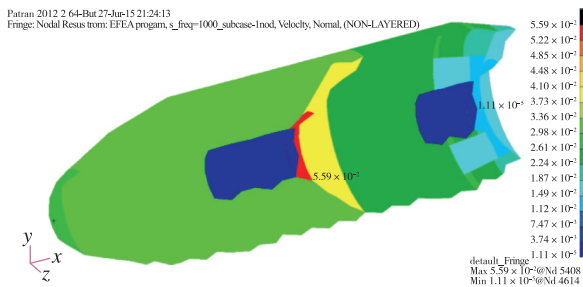


图 13 用 PATRAN 显示的结构的速度均方根分布

Fig. 13 The RMS distribution of the structure by PATRAN

图 13 采用了半剖视图，显示了整体结构的均方根速度分布，通过云图可以得到关注结构速度值极值的位置，这是能量有限元方法相对统计能量分析方法的一个优势。

在本结构中，测点主要分布在头锥、前锥、柱段、上星支架、上星过渡支架、上柱段、下柱段、倒锥、下星支架、下星过渡支架等结构的上下部位。仿真值与实测值对比如表 1 所示。

在表 1 中，采用 $20 \times \log_{10} (P/P_{\text{实测值}})$ 计算得到均方根加速度以 dB 为单位的相对误差。从表中的数据对比可以发现，采用 SEA 和 EFEA 两种方法得到的结果在大部分位置上相比差别不大，与实测值相比，两种方法大部分测量位置的加速度响应基本满足工程要求，但 EFEA 方法能够得到更加精细的响应分布信息。此外，考虑到能量有限元方法在连接部分能量密度是不连续的，而统计能量分析方法是对于系统进行平均的结果，所以在连接部分实际上也是理论上产生较大误差的位置。综上考虑，采用 EFEA 对整流罩进行的振动环境预示基本符合预期。

表 1 主要结构部分的均方根加速度值比较

Tab. 1 The RMS of the Acceleration of the main structure

	SEA/g	误差/dB	EFEA/g	误差/dB	实测/g
头锥	20.9	-1.263	27.50	1.121	24.17
前锥上	23.4	3.921	28.09	5.507	14.9
前锥下	23.4	-0.187	29.78	1.907	23.91
柱段上	21.8	0.433	30.93	3.471	20.74
柱段下	21.8	3.984	30.58	6.924	13.78
上星支架上	16.4	2.786	38.21	10.133	11.9
上星支架下	16.4	0.722	39.22	8.295	15.092
上星过渡支架上	31.88	3.143	28.14	2.059	22.2
上星过渡支架下	31.88	6.388	30.61	6.035	15.28
上柱段上	23.4	5.032	25.47	5.769	13.11
上柱段下	23.4	2.918	25.17	3.551	16.723
下柱段上	23	-0.355	25.14	0.418	23.96
下柱段下	23	2.605	24.55	3.172	17.04
下星支架上	10.96	1.034	10.68	0.809	9.73
下星支架下	10.96	0.875	10.75	0.707	9.91
下星过渡支架上	13.93	-0.666	13.57	-0.893	15.04

此外，通过对 3 种尺度模型，采用 SEA 和 EFEA 方法进行了计算效率的比较，模型及计算耗时如表 2 所示。

表2 两种方法计算耗时比较 (单位: s)

Tab.2 Computation time costs of SEA and EFEA (unit: s)

模型	1子系统/121节点	7子系统/1933节点	72子系统/9564节点
SEA	0.273	1.50	14.61
EFEA	0.60	8.36	134.42

从理论上来说,计算的频带数和子系统数目决定了SEA方法的计算耗时,而EFEA方法则与计算频带数与模型的节点数/自由度数相关,EFEA方法的计算耗时大于SEA方法,这与理论预期是相符的。有限元方法的计算耗时取决于模型的自由度数,且有限元方法和EFEA方法进行求解使用的求解器是相同的,理论上来说自由度数相同时,两者的计算耗时应该是相近的,所以本文未单列出有限元的计算耗时。但是对于相同的模型,EFEA方法由于可以划分更为粗略的网格,因而理论上可以很大程度上减少有限元方法的计算量。

5 结论

本文采用EFEA方法,建立了某双星整流罩结构的能量有限元模型,同时建立了该结构的SEA模型,完成了该结构的振动环境的预示,通过对EFEA、SEA方法的预示结果与实验测试结果的比较可知,采用能量有限元方法可以较好地完成复杂工程结构在中间频段内的振动环境预示工作,且相对于SEA方法,EFEA可以得到预示结果的空间分布。在本文中,将EFEA方法运用到较为复杂的实际工程结构,并给出了采用NAS-TRAN中EFEA模块进行能量有限元建模的方法,可以为后续该方法的研究以及在航天工程中的进一步应用提供一定的借鉴。

参考文献

- [1] Noiseux D U. Measurement of power flow in uniform beams and plates [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1970, 47 (1B): 238-247.
- [2] Nefske D J, Sung S H. Power flow finite element analysis of dynamic systems; basic theory and application to beams [J]. Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 1989, 111 (1): 94-100.
- [3] Zhang W, Wang A, Vlahopoulos N, et al. High-frequency vibration analysis of thin elastic plates under heavy fluid loading by an energy finite element formulation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 263 (1): 21-46.
- [4] Vlahopoulos N, Schiller N, Lee S. Energy finite element analysis developments for vibration analysis of composite aircraft structures [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4 (2011-01-1734): 593-601.
- [5] 孙丽萍, 聂武. 能量有限元法在船舶结构中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40 (9): 1491-1494.
- [6] 徐福慧. 结构中高频响应预示的能量有限元法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [7] 林毅. 基于能量有限元法的导弹舱体结构载荷环境预示研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] 游进, 李鸿光, 孟光. 耦合板结构随机能量有限元分析 [J]. 振动与冲击, 2009, 28 (11): 43-46.
- [9] 陈书明, 王登峰, 谭刚平, 等. 基于能量有限元方法的声腔内部噪声预测 [J]. 吉林大学学报 (工), 2012, 42 (2): 303-308.
- [10] 孙目, 潘忠文. 卫星整流罩噪声环境预示与降噪设计 [J]. 导弹与航天运载技术, 2008 (4): 6-10.
- [11] 王昆. 飞行器结构统计能量建模方法及声振响应分析研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [12] 宋海洋, 于开平, 韩敬永. 大型运载火箭整流罩减振降噪问题研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2014 (3): 16-19.
- [13] 赵小见, 路红, 宋玉辉, 等. 飞行器结构声载荷响应及舱内噪声研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2014 (3): 11-15.
- [14] 朱卫红, 韩增尧, 邹元杰, 等. 航天器声振力学环境预示与验证 [J]. 宇航学报, 2016, 37 (9): 1142-1149.
- [15] Cremer L, Heckl M, Petersson B A T, et al. Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
- [16] Wohlever J, Bernhard R. Energy distributions in rods and beams [C]. 12th Aeroacoustic Conference. 1989: 1122.
- [17] Bouthier O M, Bernhard R J. Models of space-averaged energetics of plates [J]. AIAA Journal, 1992, 30 (3): 616-623.
- [18] Langley R S, Heron K H. Elastic wave transmission through plate/beam junctions [J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 143 (2): 241-253.
- [19] Lyon R H, DeJong R G, Heckl M. Theory and application of statistical energy analysis [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 98 (6): 3021.
- [20] Kong X, Chen H, Zhu D, et al. Study on the validity

- region of energy finite element analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333 (9): 2601-2616.
- [21] MSC. Software. MSC. Software EFEA 2012 User's Guide [EB/OL]. https://simcompanion.msc-software.com/infocenter/index?page=content&id=DOC10009&.cat=MSC_NASTRAN_DOCUMENTATION_2012&.actp=LIST, 2011.
- [22] MSC. Software. MSC. Software EFEA 2012 Tutorial [EB/OL]. https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC10007&.cat=MSC_NASTRAN_DOCUMENTATION_2012&.actp=LIST, 2011.
- [23] 曾耀祥, 潘忠文, 李东. 基于统计能量分析法的火箭仪器舱声振环境预示 [J]. 导弹与航天运载技术, 2013 (4): 27-32.

引用格式: 王怀志, 于开平, 曾耀祥, 等. 能量有限元方法的双星整流罩中频声振环境预示[J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (5): 42-49.

Citation: Wang H Z, Yu K P, Zeng Y X, et al. Prediction for vibration environment of the double stars fairing structure based on energy finite element [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2 (5): 42-49.

(上接第 41 页)

- [5] Li X J, Liu C M, Sun Z L, et al. Effect of ionizing radiation on dual 8-bit analog-to-digital converters (AD9058) with various dose rates and bias conditions [J]. Chinese Physics B, 2013, 22 (9): 098501.
- [6] Ning B X, Hu Z Y, Zhang Z X, et al. Effects of total ionizing dose on narrow-channel SOI NMOSFETs [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62 (7): 076104.
- [7] Liu Z L, Hu Z Y, Zhang Z X, et al. Total ionizing dose effect of 0.18 μ m nMOSFETs [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60 (11): 116103.
- [8] Atwell W. Anatomical models for space radiation applications: an overview [C]. The Committee on Space Research, Washington, USA, 1992.
- [9] Wilson J W, Miller J, Konradi A, et al. Shielding strategies for human space exploration [J]. NASA Conference Publication, 1997, 31 (1): 27-34.
- [10] Xue B S, Han J W, Ye Z H. A shielding distribution analysis model for a spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22 (1): 46-49.

引用格式: 高著秀, 王玉林, 孙健, 等. 基于结构表面云图的三维总剂量效应评估方法研究[J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (5): 37-41.

Citation: Gao Z X, Wang Y L, Sun J, et al. A new method for evaluating three-dimensional total dose effects based on structure surface cloud picture [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2 (5): 37-41.