

随机基础激励下承力筒—蒙皮结构的 声—固耦合分析

李彦斌^{1,2}, 张 鹏^{1,2}, 邹元杰³, 吴邵庆^{1,2}, 费庆国^{1,2}

(1. 东南大学工程力学系, 南京 210096; 2. 江苏省工程力学分析重点实验室, 南京 210096;
3. 中国空间技术研究院总体部, 北京 100094)

摘 要: 针对航天器承力筒—蒙皮典型结构, 分别基于有限元—直接边界元法和有限元—间接边界元法建立仅考虑内/外声场和同时考虑内外声场的声—固耦合模型, 开展典型结构在随机基础激励下的声—固耦合研究, 并重点分析内外声场和声—固耦合效应对典型结构固有特性及动响应的影响。研究结果表明: 考虑声—固耦合效应后结构振型未发生变化但固有频率降低, 仅考虑单一声场效应时固有频率较同时考虑内外声场时升高; 声—固耦合效应使结构的响应整体上降低, 但在与激励方向平行的蒙皮处由于内声场的作用而增大; 内声场对动响应的影响大于外声场。

关键词: 随机基础激励; 承力筒—蒙皮结构; 声—固耦合; 有限元—直/间接边界元

中图分类号: V414.8; O32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2015)02-0236-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.02.016

Structural-Acoustic Coupling Analysis of a Bearing Cylinder-Skin Structure under Random Base Excitation

LI Yan-bin^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, ZOU Yuan-jie³, WU Shao-qing^{1,2}, FEI Qing-guo^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Key Laboratory of Engineering Mechanics of Jiangsu Province, Nanjing 210096, China;

3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on Finite element method-Direct boundary element method (FEM-DBEM) and Finite element method-Indirect boundary element method (FEM-IBEM) approach, the bearing cylinder-skin structural-acoustic coupling models considering only internal/external acoustic field and both inside and outside acoustic field are established. The structural-acoustic coupling analysis under random base excitation is researched. Further, the coupled effect of internal/external acoustic field and structural-acoustic coupling on the inherent characteristics and dynamic response is analyzed with the emphasis on. Results show that coupled effect results in the decrease of its nature frequencies, but has no effect on the modal shape. Single acoustic field effect results in the increase of the nature frequencies more than both inside and outside acoustic field effect. The coupled effect also results in the overall decrease of dynamic response, but causes increase of the dynamic response in the places where is parallel to the direction of excitation. In addition, influence of internal acoustic field on the dynamic response is greater than the external acoustic field.

Key words: Random base excitation; Bearing cylinder-skin structure; Structural-acoustic coupling; Finite element method boundary element method

0 引言

航天器在发射段承受的随机动态荷载包括气动压力和发动机噪声经整流罩透射至航天器表面的声荷载,同时还包括来自支座的随机基础激励荷载^[1-3]。航天器的真实随机力学环境是由声荷载和基础激励共同组成的,其中噪声激励的频率范围为10~10000 Hz,随机基础激励的频率范围为0~2000 Hz,而且两种荷载在各频段内对动响应的贡献各不相同^[11]。因此,在航天器的结构设计中随机基础激励荷载是不可或缺的荷载之一。承力筒—蒙皮结构以其质轻、力学性能好(尤其是抗扭转、弯曲和剪切性能等)、空间利用充分和适应性强等优点被广泛应用于卫星、火箭仪器舱等结构中。此外,飞行器与周围气流的耦合会在结构表面形成高强声压,从而引起结构和设备元件振动,容易造成仪器设备故障,进而影响飞行器运行精度与可靠性。因此,开展针对航天器承力筒—蒙皮典型结构在随机基础激励下的声—固耦合研究很有必要。

随机激励下的噪声试验能够为飞行器研发提供重要依据,然而巨大的试验耗费、较长的试验周期以及较为有限的试验条件与工况限制了其进一步的发展与应用。近年来,随着计算机性能的提高,数值模拟成为重要的分析手段,可为试验提供必要的补充。目前,声—固耦合的数值分析主要采用有限元—有限元、有限元—边界元等方法。有限元—有限元方法中结构和声场均采用有限元建模,但由于空间声场采用体单元模拟使得分析效率降低,因此其应用受到限制。白长青等^[4-5]建立了结构和声场的有限元模型,分析了声—固耦合效应对薄壁锥形和薄壁圆柱结构动响应的影响;Mohamed^[6]等采用有限元—有限元方法分析了声—固耦合效应对某变速箱结构振动及声辐射的影响。有限元—边界元方法中结构采用有限元建模,声场则采用边界元模拟,边界元法将声场内的计算转化到边界上,可使分析自由度减少,问题的维数降低,因此对于无限域或半无限域问题,采用边界元法声场无需在远场边界离散,所有计算均在结构表面进行,大大缩小了计算域。Tong等^[7]采用有限元—边界元方法计算了某潜艇典型结构的振动与声辐射响应;Buehrle等^[8]利用有限元—边界元方法分析了蜂窝夹芯复合材料板的声振耦合响应;徐张明^[9]

与刘城^[10]采用有限元—边界元方法分析了流体介质中壳体结构的振动和声辐射问题;王珺等^[11]基于有限元—边界元法建立了同时考虑内外声场的某仪器舱典型结构耦合模型,并分析了在混响声场和随机振动复合环境下声—固耦合效应对结构动响应的影响。以上这些研究工作深入研究了考虑内外声场时声—固耦合效应对声辐射及结构动响应的影响,但较少深入分析并揭示考虑声—固耦合时内声场或外声场对耦合系统固有特性的影响以及对动响应的贡献。

本文以承力筒—蒙皮典型结构为研究对象,采用有限元—边界元法对该典型结构在随机基础激励荷载下的声—固耦合特性进行了分析,并探讨了内外声场和耦合效应对耦合系统固有特性及动响应的影响。

1 随机基础激励下声—固耦合理论

有限元—边界元方法中弹性结构与声场分别采用有限元法和边界元法来分析。边界元是对边界建立起相应的边界积分方程,获得边界上的未知量之后,再求解非边界上的未知量。边界元可根据流场特点分为直接边界元和间接边界元,二者的主要区别是,前者的流体模型必须是封闭的空腔,流体介质只能在单元的一侧存在,而后者的流体模型既可以是封闭的空腔也可以是不封闭的空腔,流体模型的内部和外部都有流体介质存在。所以直接边界元模型仅能考虑内声场或外声场,间接边界元模型可以同时考虑内外声场,因而本文在仅考虑内声场或外声场时采用有限元—直接边界元分析方法,在同时考虑内外声场时采用有限元—间接边界元分析方法。

1.1 随机基础激励理论

根据随机振动理论,当结构受到单一随机激励作用时,响应功率谱密度 $S_x(\omega)$ 与激励功率谱密度 $S_f(\omega)$ 存在如下关系:

$$S_x(\omega) = \mathbf{H}^*(\omega) \mathbf{S}_f(\omega) \mathbf{H}^T(\omega) \quad (1)$$

$\mathbf{H}(\omega)$ 为响应相对于激励的频响函数, $\mathbf{H}^*(\omega)$ 为 $\mathbf{H}(\omega)$ 的共轭矩阵,对于仅考虑内/外声场和同时考虑内外声场的声—固耦合的频响函数 $\mathbf{H}(\omega)$ 可由方程(2)或方程(3)施加单位激励求得。

1.2 有限元—直接边界元理论

有限元—直接边界元方法可考虑单一封闭声场,即封闭的内声场或外声场,并建立结构与内/外声场耦合的模型。具体而言,首先对结构建立有限元结构

离散方程,对声场建立直接边界元方程,然后考虑流—固耦合面的相互作用,并在结构有限元动力学方程中加入声场对结构的作用项,在直接边界元方程中加入结构对声场的作用项,联立方程就可以建立起结构与内声场或外声场耦合的动力学方程^[12-14]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} + j\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M} & \mathbf{L}_c \\ \rho_0\omega^2\mathbf{B}\mathbf{T}_s & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{K} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{M} 分别为结构有限元的刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵; ρ_0 为声学介质密度; ω 为角频率; \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 为直接边界元影响矩阵; \mathbf{u} 与 \mathbf{p} 分别为结构位移向量与声压向量; \mathbf{T}_s 为结构法向平动位移形函数; \mathbf{F}_s 与 \mathbf{F}_a 分别为外荷载与声荷载激励向量; \mathbf{L}_c 为声学介质与结构耦合矩阵。

1.3 有限元—间接边界元理论

有限元—间接边界元方法可以同时考虑内外声场并建立结构与内外声场耦合的模型。同理,对结构建立有限元结构离散方程,对声场建立间接边界元方程,考虑流—固耦合面的相互作用,并在结构有限元动力学方程中加入声场对结构的作用项,在间接边界元方程中加入结构对声场的作用项,联立方程就可以建立起结构与内外声场耦合的动力学方程^[12-14]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} + j\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M} & \mathbf{L}_c \\ \mathbf{L}_c^T & \frac{\mathbf{D}}{\rho_0\omega^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_a \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{D} 为间接边界元影响矩阵; $\boldsymbol{\mu}$ 为声压双层势向量; \mathbf{F}_s 与 \mathbf{F}_a 分别为外荷载与声荷载激励向量; \mathbf{L}_c 为声学介质与结构耦合矩阵,其余参数的含义与式(2)相同。

2 算例研究

承力筒—蒙皮结构是航天器的基本结构之一,该结构能够较准确反映卫星和火箭仪器舱等的力学行为。本文以某承力筒—蒙皮典型结构为研究对象进行随机基础激励下的声—固耦合分析。

2.1 典型结构声—固耦合模型

典型结构中承力筒与蒙皮结构、仪器及附属结构和加筋肋分别采用壳单元、集中质量单元和梁单元进行有限元建模。同时便于基础激励的施加,在典型结构底部建立一集中质量单元,并利用 RBE2 单元将典型结构底座上的各节点耦合于该质量单元上,由于典型结构总质量约为 90 kg,大质量应为整个结构质量的 $10^3 \sim 10^8$ 倍^[9],在此 M_0 取 10^7 kg。

采用四边形单元在结构外表面建立与有限元网格尺寸相同的声学边界元模型,声学介质为空气,密度 1.225 kg/m^3 ,声速 340 m/s 。所建立的典型结构声—固耦合模型如图 1 所示。

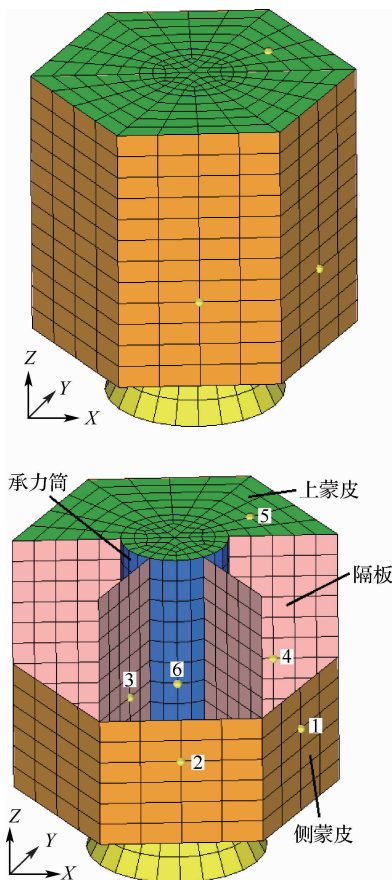


图 1 承力筒—蒙皮典型结构声—固耦合模型

Fig. 1 Structural-acoustic coupling model of bearing cylinder-skin structure

2.2 边界条件与荷载

典型结构在底座处固支,并置于空气声学介质声场中,且内声场为以外蒙皮为边界的封闭声场,外声场为开放的无界声场。

采用“大质量法”在典型结构底座处分别施加横向(X)、纵向(Y)与轴向(Z)的随机加速度基础激励,即释放支座节点相应激励方向的自由度约束,然后在大质量点上施加力荷载使约束点的动力响应与输入条件一致。由于典型结构在 XY 面内对称,所以本文仅施加横向和轴向的随机加速度基础激励。所施加的加速度功率谱密度函数如图 2 所示。

2.3 分析流程

典型结构在基础激励下会引起结构的振动,结构的振动又会推动与之接触的空气的振动,从而产生声

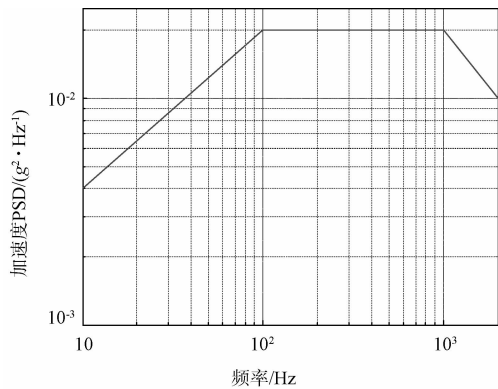


图 2 随机激励功率谱密度函数

Fig. 2 PSD of random excitation

压,声音的传播又会作用到与流体接触的结构上,在结构上产生压力,进而又引起结构的振动。为了深入研究内外声场对结构固有特性及动响应的影响,本文分别在以下三种情况下进行具体分析:(1)仅考虑内

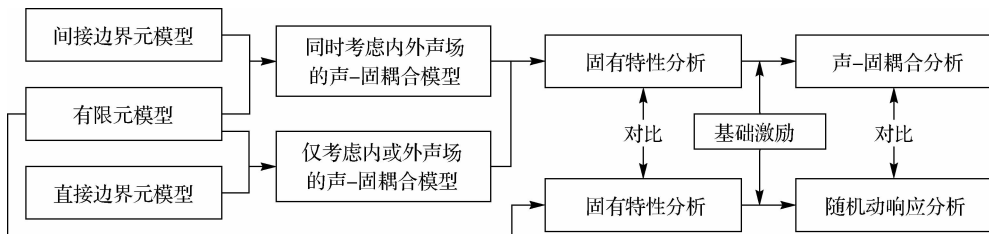


图 3 分析流程

Fig. 3 Analysis process

2.4 声—固耦合系统固有特性分析

施加 2.2 节中的荷载与边界条件,分别分析三种工况下内外声场对声—固耦合系统固有特性的影响。表 1 仅给出了结构的部分典型固有频率,典型结构的对称模态未给出。

由表 1 分析可知:(1)考虑声场后结构振型未发生变化,但分析获得的固有频率较不考虑声场有所下降,这是由于在低频段,空气对结构的影响可以简化为空气附加质量的影响,因此结构的固有频率降低,但对结构振型的影响较小;(2)仅考虑内声场或外声场时,结构固有频率较同时考虑内外声场时有所上升,这是由于忽略内声场或外声场后声场附加质量的效应减小所导致的。

2.5 声—固耦合响应分析

分别分析承力筒—蒙皮典型结构在横向与轴向加速度随机基础激励下声场及声—固耦合效应对耦合系统动响应的影响。在典型结构上选取 6 个典型

声场的影响;(2)仅考虑外声场的影响;(3)同时考虑内外声场的影响。分析流程如图 3 所示。

具体分析流程为:(1)基于典型结构的有限元模型和直/间接边界元模型建立仅考虑内/外声场和同时考虑内外声场的声—固耦合模型;(2)分别在三种工况下分析对耦合系统进行固有特性分析;(3)对典型结构在加速度随机基础激励下进行声—固耦合分析,并分析内/外声场和声—固耦合效应对结构动响应的影响。

本文的分析计算结果是基于商用有限元软件、商用声学软件、Matlab 编程以及各软件进行相互调用实现的。其中结构模态分析、频响函数分析采用商用有限元软件实现,耦合模态分析与声—固耦合分析采用商用声学软件实现,随机动响应分析与相关结果数据处理采用 Matlab 编程实现。

部位的计算结果进行具体分析,各典型部位的具体位置如图 1 所示。

2.5.1 内/外声场对结构响应的影响

为了考察内外声场对典型结构动响应的影响,本文分别分析了不考虑声场、仅考虑内声场以及仅考虑外声场时声场对结构的动响应的影响。图 4 给出了横/轴向随机基础激励时内/外声场对结构各典型部位加速度 RMS 的影响。限于篇幅,此处仅给出横/轴向基础激励时上蒙皮和侧蒙皮处的加速度功率谱密度函数曲线,如图 5 与图 6 所示。

由图 4 至图 6 分析可知:(1)仅考虑外声场时,结构响应较不考虑声场时降低;(2)仅考虑内声场时,结构响应较不考虑声场整体上降低,但在横向基础激励时上下蒙皮处、轴向基础激励时外蒙皮处增大;(3)考虑内声场或外声场后响应峰值整体上向低频处移动。这是由于空气对结构附加质量效应的影响,所以一般情况下考虑内/外声场均会由于空气

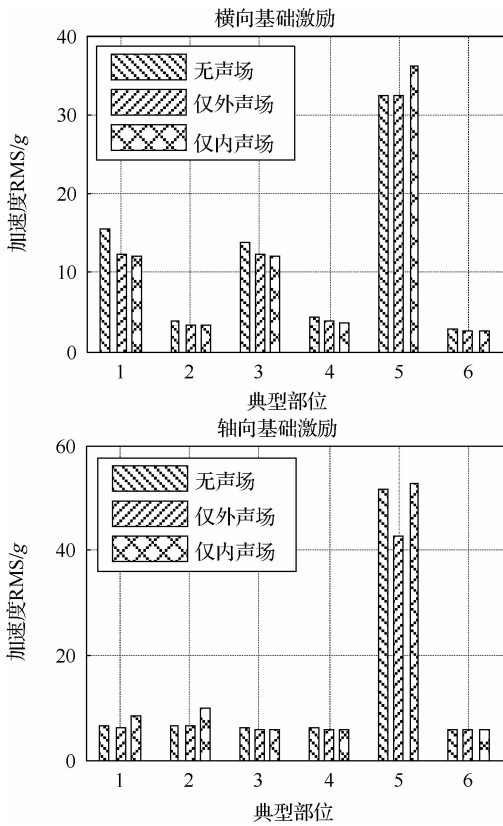


图 4 各典型部位加速度 RMS

Fig. 4 Acceleration RMS of each concern node

表 1 典型结构考虑内外声场时部分典型固有频率 (Hz)

Table 1 Nature frequencies considering the internal and external acoustic field (Hz)

阶次	无声场	仅内声场	仅外声场	内外声场
1	18.64	18.49	18.61	18.47
3	39.54	39.53	39.53	39.52
4	42.82	42.19	41.93	41.26
5	43.70	42.27	42.63	41.40
7	45.80	42.82	44.78	41.74
9	46.60	46.19	46.54	46.05
10	63.89	58.46	63.07	57.63
11	64.12	62.87	62.23	61.87
13	64.34	63.16	63.37	62.26
15	64.84	63.23	63.85	62.28
16	71.70	70.99	71.41	70.48

附加质量效应影响导致结构响应降低并向低频处移动。但由于内声场是一封闭的声腔,所以横向或轴向基础激励时内声腔中的空气有向与激励方向垂直方向运动的趋势,进而导致在仅考虑内声场时上下蒙皮或侧蒙皮处的响应增大。

2.5.2 耦合效应对响应的影响

为了考察声—固耦合效应对典型结构动响应的

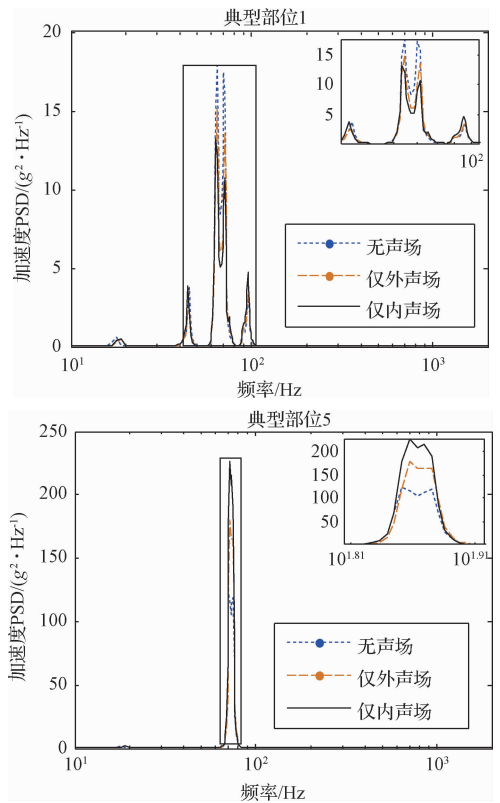


图 5 横向激励时各典型部位加速度功率密度函数

Fig. 5 Acceleration PSD of each concern node under lateral load

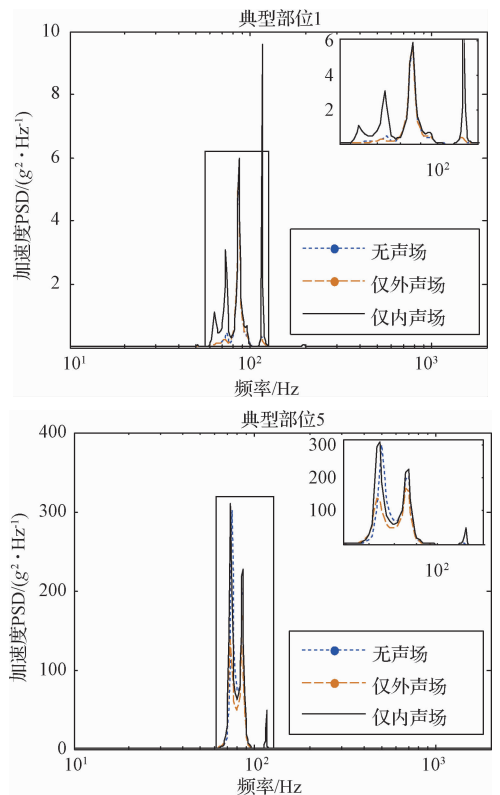


图 6 轴向激励时各典型部位加速度功率密度函数

Fig. 6 Acceleration PSD of each concern node under axial load

影响,本文分别对典型结构在考虑与不考虑耦合两种情况下分析随机基础激励下声—固耦合效应对结构动响应的影响。图 7 给出了耦合效应对结构各典型部位加速度 RMS 的影响,限于篇幅,此处仅给出横/轴向基础激励时上蒙皮和侧蒙皮处的加速度功率谱密度函数曲线,如图 8 与图 9 所示。

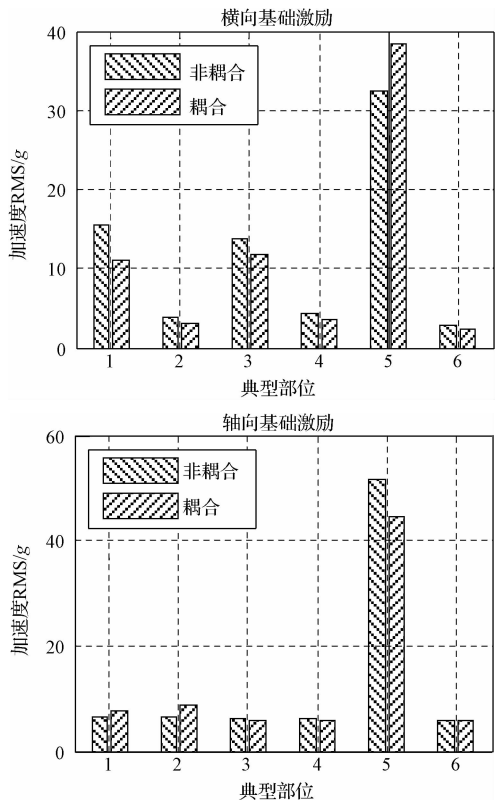


图 7 各典型部位加速度 RMS

Fig. 7 Acceleration RMS of each concern node

由图 7~9 可知:(1)考虑声—固耦合后结构响应峰值整体向低频移动,这是由考虑声—固耦合后耦合系统的固有频率降低所导致的;(2)结构响应主要集中在 100 Hz 以内,且以低频段响应为主;(3)横向基础激励时,结构响应较耦合前在上下蒙皮处增大,在其它部位减小;轴向基础激励时,结构响应较耦合前在侧蒙皮处增大,在其它部位减小。这也是由于空气附加质量效应影响,所以一般情况下考虑声场会导致结构响应减小,但在横向基础激励时上下蒙皮处与轴向基础激励时侧蒙皮处,由 2.5.1 节分析可知,结构的动响应由于封闭内声场的作用而增大。

从上述分析结果可知,在具有承力筒—蒙皮结构的飞行器设计时需考虑声—固耦合效应对结构动响应的影响,否则会导致某些部位的设计值偏小,进而危及飞行器的安全。

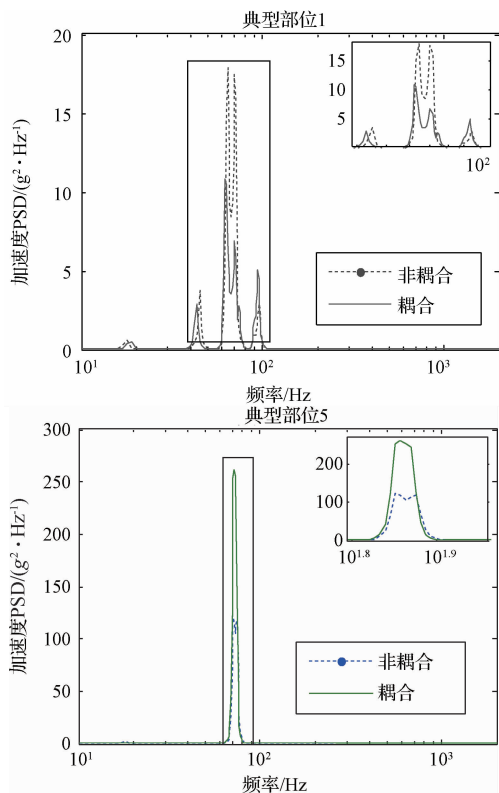


图 8 横向激励时各典型部位加速度功率密度函数

Fig. 8 Acceleration PSD of each concern node under lateral load

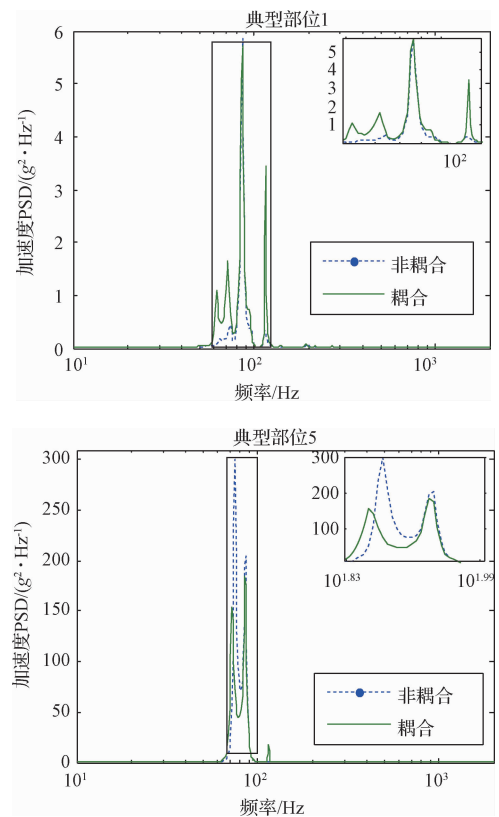


图 9 轴向激励时各典型部位加速度功率密度函数

Fig. 9 Acceleration PSD of each concern node under axial load

3 结 论

本文以航天器常用承力筒—蒙皮典型结构为研究对象,基于有限元—直接边界元方法建立了仅考虑内/外声场的声—固耦合模型,基于有限元—间接边界元方法建立了同时考虑内外声场的声—固耦合模型,开展了该典型结构在随机基础激励荷载下的声—固耦合研究,分析了内外声场和耦合效应对耦合系统固有特性及动响应的影响。

分析结果表明:(1)考虑声场后耦合模型的振型较耦合前未发生变化,而固有频率较耦合前下降;(2)仅考虑单一内或外声场时,固有频率较同时考虑内外声场时有所上升;(3)仅考虑外声场时,结构响应较不考虑声场时降低;(4)仅考虑内声场时,结构响应较不考虑声场整体上降低,但在横向基础激励时上下蒙皮处、轴向基础激励时外蒙皮处增大;(5)考虑声—固耦合后,横向基础激励时响应在上下蒙皮处增大,在其它部位减小,轴向基础激励时响应在侧蒙皮处增大,在其它部位减小;(6)考虑声场后响应峰值整体上向低频处移动;(7)结构的响应主要集中在 100 Hz 以内,且以低频段响应为主。

参 考 文 献

- [1] 马兴瑞, 于登云, 韩增尧, 等. 星箭力学环境分析与试验技术研究进展[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 323-330. [Ma Xing-rui, Yu Deng-yun, Han Zeng-yao, et al. Research evolution on the satellite-rocket mechanical environment analysis & test technology [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 323-330.]
- [2] 马兴瑞, 韩增尧, 邹元杰, 等. 航天器力学环境分析与条件设计研究进展[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 1-12. [Ma Xing-rui, Han Zeng-yao, Zhou Yuan-jie, et al. Review and assessment of spacecraft mechanical environment analysis and specification determination [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(1): 1-12.]
- [3] 马兴瑞, 苟兴宇, 李铁寿, 等. 航天器动力学发展概况[J]. 宇航学报, 2000, 21(3): 1-5. [Ma Xing-rui, Gou Xing-yu, Li Tie-shou, et al. Development generalization of spacecraft dynamics [J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(3): 1-5.]
- [4] 白长青, 周进雄, 闫桂荣. 截锥形薄壁结构声振耦合动力学特性分析[J]. 应用力学学报, 2010, 27(1): 28-32. [Bai Chang-qing, Zhou Jin-xiong, Yan Gui-rong. Dynamic characteristics analysis of a truncated conical thin-walled shell with acoustic-structure coupling [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(1): 28-32.]
- [5] 白长青, 周进雄, 闫桂荣. 声振耦合对薄壁圆柱结构动力特性的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 78-92. [Bai Chang-qing,

- Zhou Jin-xiong, Yan Gui-rong. Effects of sound field on thin-wall cylindrical structure dynamic characteristics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 78-92.]
- [6] Mohamed S A, Slim B, Fakher C, et al. An acoustic-structural interaction modelling for the evaluation of a gearbox-radiated noise [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008, 50(3): 569-577.
- [7] Tong Z P, Zhang Y, Zhang Z Y, et al. Dynamic behavior and sound transmission analysis of a fluid-structure coupled system using the direct-BEM/FEM [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 299: 645-655.
- [8] Buehrle R D, Robinson J H, Grosveld F V. Vibro-Acoustic model validation for a curved honeycomb composite panel[R]. AIAA-2001-1587, 1-9.
- [9] 徐张明, 沈荣瀛, 华宏星. 利用 FEM/IBEM 计算流体介质中的壳体的结构声耦合问题[J]. 振动工程学报, 2002, 15(3): 363-367. [Xu Zhang-ming, Shen Rong-ying, Hua Hong-xing. Structural-acoustic coupling problem of an immersed shell by FEM/IBEM [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(3): 363-367.]
- [10] 刘城. 基于 FEM/IBEM 的浸水结构振动特性及声辐射特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. [Liu Cheng. Research on vibration and radiation characteristics of submerged structures based on FEM/IBEM [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.]
- [11] 王珺, 张景绘, 宁纬. 复合环境激励下的声振耦合分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 15-18. [Wang Jun, Zhang Jing-hui, Ning Wei. Sound-vibration coupling analysis under combined environment [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 15-18.]
- [12] Seybert A F, Wu T W, Li W L. A coupled FEM/BEM for fluid-structure interaction using ritz vectors and eigenvectors [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1993, 115(2): 152-158.
- [13] Vlahopoulos N, Raveendra S T, Vallance C, et al. Numerical implementation and applications of a coupling algorithm for structural-acoustic models with unequal discretization and partially interfacing surfaces [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1999, 32(4): 257-277.
- [14] Feng J L, Zheng X P, Wang H T, et al. Low-frequency acoustic-structure analysis using coupled FEM-BEM method [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1-8.

作者简介:

李彦斌(1986-),男,博士生,主要从事多场耦合结构动力学分析理论与方法的研究。

通信地址:江苏省南京市玄武区四牌楼2号工程力学系(210096)

电话:(025)83790168

E-mail:liyanbin0603@163.com

(编辑:曹亚君)