

空间站吸声降噪设计的仿真评估与验证

武耀¹, 冯咬齐^{1,2}, 冯国松¹, 杨江¹, 魏博¹

(1. 北京卫星环境工程研究所; 2. 北京卫星环境工程研究所可靠性与环境工程技术重点实验室: 北京 100094)

摘要: 文章针对空间站吸声降噪设计中存在的降噪效果评估问题, 以空间站缩比结构为研究对象, 利用声学有限元法进行吸声降噪设计仿真评估。首先建立适用于空间站的吸声降噪设计仿真评估模型, 然后通过地面噪声试验验证仿真模型的准确性; 最后对几种空间站可用的不同性质的吸声材料在缩比结构中的降噪效果进行了定量仿真评估。结果表明塑料泡沫的降噪效果最好, 其次是浇注泡沫; 浇注泡沫的质量相对较轻。本研究可为预先定量评估空间站吸声降噪设计提供参考。

关键词: 空间站; 吸声材料; 舱内噪声; 声学有限元法

中图分类号: V416.2; O242.21

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2018)04-0330-06

DOI: [10.3969/j.issn.1673-1379.2018.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1379.2018.04.004)

Simulations for evaluation and verification of acoustic design of space station module

WU Yao¹, FENG Yaoqi^{1,2}, FENG Guosong¹, YANG Jiang¹, WEI Bo¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering; 2. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering: Beijing 100094, China)

Abstract: The evaluation of the space station noise reduction design is a necessary step. For a 1/3-scaled space station structure, the noise reduction design of the space station is evaluated by the acoustic FEM method. Based on the characteristics of the space station, a suitable simulation analysis model is established for the acoustic design of the space station. The developed model is verified by the ground noise test on the 1/3-scaled space station structure. Finally, this method is used to evaluate the noise reduction effects of different kinds of acoustic absorbing materials used for the space station. It is shown that the plastic foam has the best noise reduction performance, followed by the cast foam which enjoys a relative small mass density. The methods may be used for evaluating the acoustic design in advance for the manned space station module.

Key words: space station; sound-absorbing material; inner-cabin noise; acoustic FEM

收稿日期: 2018-04-27; 修回日期: 2018-07-18

基金项目: 国家重大科技专项工程

引用格式: 武耀, 冯咬齐, 冯国松, 等. 空间站吸声降噪设计的仿真评估与验证[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(4): 330-335
WU Y, FENG Y Q, FENG G S, et al. Simulations for evaluation and verification of acoustic design of space station module[J].
Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(4): 330-335

0 引言

随着载人航天技术的发展和空间实验技术研究的展开, 航天器规模不断扩大, 航天员在轨时间不断延长。空间站要为航天员提供宜居的生活和工作环境^[1]。噪声是空间站的重要环境因素之一: 长时间持续、过度的噪声环境会影响航天员的睡眠质量, 使航天员极易感到疲劳, 导致其工作效率下降^[2]; 此外, 噪声还会给航天员之间的沟通交流带来障碍, 更严重的会造成航天员听力损伤甚至失聪。因此, 航天医学组织对空间站提出了噪声控制指标^[3], 要求空间站研制中须对舱内噪声水平进行预测、评估以及合理的控制^[4]。

降噪的常用方法是将吸声材料铺设到物体表面, 空间站同样可通过此方法来降低舱内的噪声^[5]。铺设吸声材料时, 通常要先运用经验公式进行效果预估, 然后进行实际噪声测试, 最后根据测试结果对方案反复迭代得到最优的设计结果。然而, 对空间站而言, 其内部结构极其复杂, 不能轻易更换吸声材料, 在某些阶段又不具备噪声测试的条件, 故很难通过测试的方式进行迭代设计。因此, 设计前的降噪效果预测评估显得十分重要且必要。

依托于经验公式的噪声评估方法应用于空间站具有极大的不确定性, 一方面, 空间站内部结构极为复杂, 经验公式很难预估准确; 另一方面, 由于空间站对载荷及内部空间的特殊需求, 通常需要综合运用一种材料的吸声、隔声两方面性能来进行降噪设计, 这会使噪声预估误差增大。

为使降噪效果评估更准确, 本文以声学有限元分析为手段, 研究利用仿真方法进行空间站吸声降噪效果评估。直接应用空间站整器进行研究具有很多不便, 因此本文首先建立空间站核心舱缩比结构, 以此为研究对象, 根据空间站的声学设计特点, 研究适用于空间站的吸声设计仿真评估建模方法; 然后根据实际情况选取评估位置, 兼顾吸声材料吸声、隔声两方面的性能, 利用试验结果来验证仿真模型; 最后应用经过验证的仿真模型, 对几种空间站可用的不同性质的吸声材料在空间站缩比结构中的降噪效果进行定量评估。

1 空间站缩比模拟结构

为了便于研究, 并且更接近真实的空间站内部

环境, 建造了空间站的 1/3 缩比模拟结构(如图 1^[6]所示)进行研究。缩比模拟结构的主体为铝板围成的筒状结构, 内部由骨架支撑。真实空间站结构中核心舱中央为方形的人行通道, 人行通道的壁面与筒壁围成的空间为仪器设备舱。在缩比模拟结构中, 同样在中间设置方形的人行通道, 人行通道的四壁可以通过骨架固定, 壁板用螺栓与骨架固定, 可方便拆卸。主体结构上部设计有金属盖板, 外部设计有方便整体吊装的吊耳。如图 2 所示, 模拟结构分为上舱段和下舱段, 在下舱段与上舱段的交接部分设计了 1 个声源模拟储存舱, 模拟仪器设备的安装位置。储存舱由穿孔率大于 20% 的穿孔板围成, 其内部既便于固定吸声材料又可承载声源模拟发声器。



图 1 空间站缩比模拟结构

Fig. 1 The 1/3-scaled module of space station

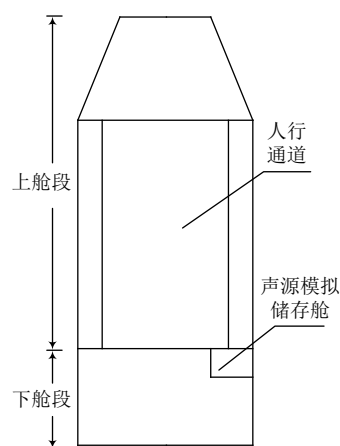


图 2 缩比结构内部示意

Fig. 2 The interior layout of the 1/3-scaled module

缩比结构内部根据空间站的实际情况布置吸声材料(三聚氰胺泡沫): 将 30 mm 厚的吸声材料固

定于骨架之上,直接围成方形的人行通道;在上舱段筒壁内侧铺设 30 mm 厚吸声材料;在声源模拟储存舱的穿孔板上铺设 30 mm 厚吸声材料。

2 降噪效果仿真

理想连续介质中声场的基本控制方程为 Helmholtz 方程^[7]

$$\nabla^2 p + k_0^2 p = 0,$$

式中: p 为声压; $k_0 = \omega/c_0$ 为波数, ω 为角频率, c_0 为介质中的声速。

在工程中常采用数值计算的办法来求解此方程,声学有限元法是其中最常用的方法。在应用有限元法进行计算时,首先将声场分成若干单元,单元之间通过一定数量的顶点相互连接,求解各节点上的声压可得到单元内任意点的声压。为满足求解精度,离散时单元的尺寸要远远小于弹性波的波长^[8]。

建立图 1 所示缩比结构的声学有限元模型,如图 3 所示。除吸声材料外,其余介质为常温常压下的空气以及外表面刚性壁。



图 3 缩比结构的声学有限元模型

Fig. 3 Acoustic FEM model of the 1/3 scale module

在仿真分析中,可以用吸声系数、声阻抗等来表征吸声材料的吸声特性。根据空间站的特点,为能真实反映吸声材料在实际工作中的吸声、隔声两方面特性,本方法对吸声材料进行精细化建模,模型中包含材料的实际厚度、流阻率、孔隙率等基本物理属性。吸声材料内外表面均为空气介质,实体结构直接与空气相连。图 4 为仿真模型中的吸声材料(三聚氰胺泡沫),主要分布在缩比结构内表面、人行通道四壁以及声源模拟储存舱壁穿孔板等处。该材料的密度为 8.8 kg/m^3 ,流阻率为 $10\,900 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}$,孔隙率为 0.99。

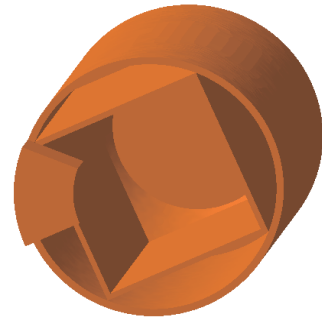


图 4 吸声材料的有限元模型

Fig. 4 Acoustic FEM model of the sound-absorbing material

对图 3 所示模型采用四面体网格进行划分,遵循 1 个波长内至少 6 个单元的原则。图 5 为模型单元最高计算频率云图,不同颜色代表单元的最高计算频率。可以看出,大部分单元的计算频率在 500 Hz 以上,因此用该模型进行 500 Hz 以内的噪声计算是可行的。

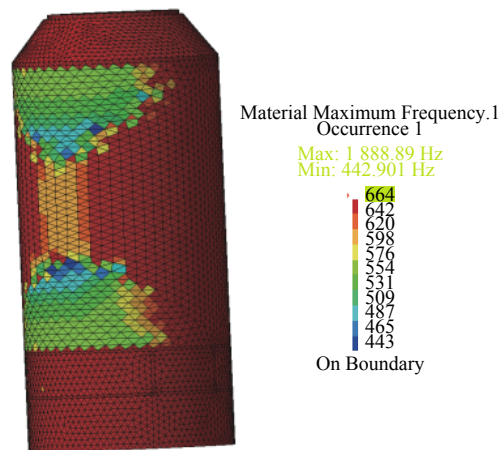


图 5 缩比模型的单元最高计算频率云图

Fig. 5 The maximum computation frequency of the FEM elements

对于空间站而言,主要噪声源在仪器设备位置,人员主要活动在人行通道中,因此,在仿真模型中 3 个典型位置布置了测点,用来评价降噪设计的降噪效果。如图 6 所示,测点位置分别为:测点 1 在声源模拟储存舱内靠近声源的位置;测点 2 在人行通道中心区域,与测点 1 等高;测点 3 也在人行通道中心区域,高度在纵轴线的中心偏上位置。

用单级子声源来模拟空间站设备噪声,将其设置在模型的声源模拟储存舱中,如图 7 中白色点所示。为贴近实际情况,选取空间站中某单机的实测噪声频谱为声源输入谱,如表 1 所示。

通过计算,获得 3 个测点的声压级响应,如表 2 所示。

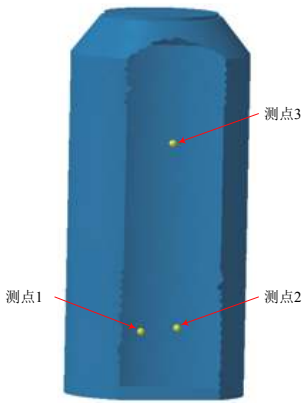


图 6 仿真模型中的噪声测点位置

Fig. 6 Measurement points for the FEM acoustic model

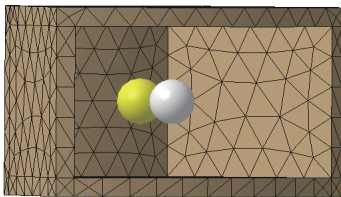


图 7 仿真模型中的声源

Fig. 7 The noise source for the FEM acoustic model

表 1 空间站单机噪声频谱

Table 1 Noise frequency spectrum of a typical equipment in space station

倍频程带宽中心频率/Hz	声压级/dB
31.5	46
63.0	52
125.0	59
250.0	81
500.0	78
总声压级/dB	82.8

表 2 各位置测点的噪声仿真预测结果

Table 2 Noise spectrum analysis at three measurement points

倍频程带宽中心频率/Hz	声压级/dB		
	测点 1	测点 2	测点 3
31.5	75.93	39.69	65.74
63.0	78.06	70.82	61.38
125.0	87.84	54.98	62.94
250.0	102.87	84.60	75.75
500.0	94.42	81.15	71.74
总声压级/dB	103.60	86.30	77.80

表 3 降噪效果的仿真结果与试验测量结果对比

Table 3 Comparison of noise responses between simulation and test results

倍频程带宽中心频率/Hz	声压级/dB								
	测点 1			测点 2			测点 3		
	仿真	测量	误差	仿真	测量	误差	仿真	测量	误差
31.5	75.93	73.98	1.95	39.69	52.25	-12.56	65.74	59.66	6.08
63.0	78.06	77.70	0.36	70.82	67.41	3.41	61.38	61.45	-0.07
125.0	87.84	85.84	2.00	54.98	54.39	0.59	62.94	64.93	-1.99
250.0	102.87	103.8	-0.93	84.60	84.85	-0.25	75.75	76.42	-0.67
500.0	94.42	99.32	-4.90	81.15	83.68	-2.53	71.74	72.60	-0.86
总声压级/dB	103.60	105.20	-1.60	86.30	87.40	-1.10	77.80	78.30	-0.50

通过仿真预测结果可以看出，人行通道中 2 个测点的总声压级分别比声源模拟舱内声源附近测点的总声压级降低了 17.3 dB 和 25.8 dB。另外，人行通道中测点的频谱与声源频谱的表现特征一致，在 250 Hz 和 500 Hz 两频段内的声压级相对较高。

3 仿真模型的地面试验验证

利用空间站某单机噪声频谱作为输入，在地面针对空间站缩比模拟结构开展了噪声模拟试验来验证仿真分析模型。

如图 8 所示，根据仿真模型中的测点位置，在缩比模型舱内对应布置了 3 个噪声传感器来测量目标场点的声压响应，在声源模拟储存舱当中放置一个电喇叭来模拟仿真模型中的单级子声源，电喇叭通过导线连至外部功放再连接至外部控制系统。



图 8 缩比模型舱内的声传感器及模拟声源

Fig. 8 The location of microphones and the noise source in the 1/3-scaled module

控制系统按表 2 所示的空间站单机噪声频谱对声源进行开环控制，降噪效果的测试结果见表 3。表 3 中数据显示：人行通道中 2 个传感器的声压频谱与声源频谱特征一致，在 250 Hz 和 500 Hz 频段内量级相对较高，与仿真分析所揭示的规律一致；在三聚氰胺泡沫吸声、隔声综合作用下，人行通道中 2 个测点的全频段总声压级较储存舱内部的声源分别降低了 17.8 dB 和 26.9 dB，与仿真结果基本吻合。

3个测点总声压级的仿真与测量结果间的误差分别为1.6、1.1、0.5 dB,各个倍频程频带声压级的仿真与测量结果间的误差除了个别频带外均在2 dB以内。对于个别频带声压级误差较大的原因,有待进一步的深入研究。

综上,仿真方法评估结果与地面试验测量结果所揭示的规律具有较好的一致性,验证了该空间站吸声降噪效果仿真评估模型的准确性和适用性。

4 吸声材料降噪效果预估

利用第2章给出的仿真模型,对空间站可用的几种不同性质吸声材料的降噪效果进行预估。

表5 不同吸声材料的物性参数

Table 5 The noise level in the source area after applying the materials listed

倍频程带宽 中心频率/Hz	声压级/dB				
	浇注泡沫	聚酯泡沫	聚氨酯泡沫	塑料泡沫	三聚氰胺泡沫
31.5	82.6	77.5	71.6	92.7	75.9
63.0	84.5	79.5	74.0	94.0	78.1
125.0	89.3	88.0	87.5	93.2	87.8
250.0	103.0	103.0	102.8	102.2	102.9
500.0	93.9	94.3	94.6	93.0	94.4
总声压级/dB	103.7	103.7	103.6	103.9	103.6

表6 铺设不同吸声材料后人行通道测点处噪声仿真预估

Table 6 The noise level in the core area after applying the materials listed

测点2					
倍频程带宽 中心频率/Hz	声压级/dB				
	浇注泡沫	聚酯泡沫	聚氨酯泡沫	塑料泡沫	三聚氰胺泡沫
31.5	41.3	40.0	40.8	41.0	39.7
63.0	70.8	70.8	71.0	70.0	70.8
125.0	55.6	55.3	52.7	55.7	55.0
250.0	81.9	84.3	83.0	72.5	84.6
500.0	79.2	80.7	83.0	75.5	81.2
总声压级/dB	84.0	86.0	86.2	78.0	86.3
降噪效果/dB	19.7	17.7	17.4	25.9	17.3
测点3					
倍频程带宽 中心频率/Hz	声压级/dB				
	浇注泡沫	聚酯泡沫	聚氨酯泡沫	塑料泡沫	三聚氰胺泡沫
31.5	65.7	65.7	65.8	65.5	65.7
63.0	61.3	61.3	61.7	60.6	61.4
125.0	62.7	63.1	61.1	57.6	62.9
250.0	72.6	75.4	67.7	69.5	75.8
500.0	63.1	70.2	75.4	57.0	71.7
总声压级/dB	74.0	77.2	76.8	71.6	77.8
降噪效果/dB	29.7	26.5	26.8	32.3	25.8

由表5可以看出,对于声源储存舱内的测点,铺设几种吸声材料后总声压级变化不明显。由表6可以看出:

1)对于人行通道中心与声源在同一高度的测

过程中,声源输入频谱不变,模型中的吸声材料分别为浇注泡沫、聚酯泡沫、聚氨酯泡沫和塑料泡沫,吸声材料厚度为30 mm。以安装吸声材料后测点2、测点3的声压级变化为参考,分析这4种吸声材料的降噪效果。几种吸声材料的物性参数如表4所示。

表4 不同吸声材料的物性参数

Table 4 Physical properties of sound-absorbing materials

吸声材料	密度/(kg·m ⁻³)	流阻率/(N·s·m ⁻⁴)	孔隙率
浇注泡沫	22	26 000	0.94
聚酯泡沫	30	13 500	0.98
聚氨酯泡沫	22	5 000	0.96
塑料泡沫	31	87 000	0.97

铺设不同吸声材料后,声源及人行通道内测点的噪声仿真预估结果分别如表5及表6所示。

点(测点2)附近区域,几种吸声材料在31.5 Hz以及63 Hz处的降噪效果相近;125 Hz处聚氨酯泡沫的降噪效果稍好;在250 Hz以及500 Hz处塑料泡沫的降噪效果最为明显,其次为浇注泡沫,其他几

种材料的降噪效果相近。

2)对于人行通道中心区域(测点3),与测点2略有不同,不同吸声材料的降噪效果在63 Hz频段已出现区别,塑料泡沫略好于其他材料;当声源频率高于125 Hz后,除聚氨酯泡沫外,其他几种材料的降噪效果趋同,由强到弱依次为塑料泡沫、浇注泡沫、聚酯泡沫、三聚氰胺泡沫。

对总声压级进行分析可以看出,在吸声、隔声综合作用下,几种材料均具有降低噪声的效果。塑料泡沫对人行通道内两测点处的降噪效果最为明显,分别降低了25.9 dB以及32.3 dB。

综上所述,该模型中塑料泡沫材料的降噪效果最好,其次是浇注泡沫,其他几种材料的降噪效果相当。而从材料的物性数据还可以看出,浇注泡沫的密度要低于其他几种材料,即相同体积的浇注泡沫的质量会更小。

5 结束语

本文以空间站缩比模拟结构为对象,针对空间站特点利用声学有限元法进行吸声降噪设计效果仿真评估。首先研究适用于空间站的吸声降噪设计声学有限元建模方法,通过细化吸声材料建模的方式来实现对材料吸声、隔声两种特性综合作用下的降噪效果评估;然后通过地面噪声试验测试,验证了仿真评估模型的准确性;最后利用仿真模型预估方法对几种不同性质的空间站吸声材料的降噪效果进行了对比分析,评估了不同吸声材料的降噪效果,可为空间站的声学设计提供借鉴。

由于缩比结构与空间站的真实结构还存在差异,若要更精确地定量评估吸声材料在空间站整器中的降噪效果,还需根据整器的结构数据,利用本文所研究的建模方法建立整器的仿真分析模型做

进一步的分析。本文的研究工作为预先定量评估空间站吸声降噪设计奠定了基础,方法与所得结果具有一定的工程意义。

参考文献 (References)

- [1] 周建平. 我国空间站工程总体构想[J]. *载人航天*, 2013, 19(2): 1-11
ZHOU J P. Chinese space station project overall vision[J]. *Manned Spaceflight*, 2013, 19(2): 1-11
- [2] 张帆, 杨江, 冯咬齐, 等. 空间站舱内噪声评价与降噪技术现状及建议[J]. *航天器环境工程*, 2014, 31(2): 223-227
ZHANG F, YANG J, FENG Y Q, et al. Current state of art and suggestions about noise evaluation and control for the space station[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2014, 31(2): 223-227
- [3] 刘建建. 空间站舱内环境噪声的危害与降噪措施[C]//中国宇航学会深空探测与专业技术委员会第六届学术年会暨863计划深空探测与空间试验技术学术研讨会论文集, 2009: 488-490
- [4] ALLEN C S. International space station acoustics-A status report[C]//45th International Conference on Environmental Systems. Bellevue, Washington, 2015
- [5] 魏传锋, 张伟, 曹剑峰, 等. 载人航天器密封舱噪声控制与试验[J]. *航天器环境工程*, 2013, 30(1): 91-93
WEI C F, ZHANG W, CAO J F, et al. Noise control and verification for manned spacecraft pressurized cabin[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(1): 91-93
- [6] 冯国松, 杨江, 武耀, 等. 空间站舱内噪声仿真、验证与声源布局优化[J]. *航天器环境工程*, 2017, 34(5): 471-477
FENG G S, YANG J, WU Y, et al. Simulation and validation of interior noise and optimization of sound source layout for space station module[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(5): 471-477
- [7] 武耀. 船舶舱室内空调噪声预报与声学设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 14
- [8] 李增刚, 詹福良. *Virtual.Lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 47-50

(编辑: 张艳艳)