

基于微穿孔板的模型直升机舱内降噪研究*

李程磊¹, 陆洋¹, 李森琛², 马锦超¹

(1. 南京航空航天大学航空学院 南京, 210016)

(2. 武汉第二船舶设计研究所 武汉, 430205)

摘要 为验证微穿孔板吸声结构对直升机舱内噪声抑制的可行性和有效性, 基于某轻型直升机模型机舱, 开展了仿真与试验研究。首先, 给出了适用于直升机舱内壁板的典型微穿孔板吸声结构方案; 其次, 建立了主减速器/机体声振耦合有限元模型, 得到了微穿孔板吸声结构的设计频率范围, 并通过仿真验证了吸声效果; 最后, 搭建了安装有微穿孔板吸声结构的模型直升机机舱试验平台, 开展了舱内噪声试验研究。结果表明, 在机舱内安装微穿孔板吸声结构后, 相比于未安装微穿孔板机舱, 在 800~1 000 Hz 和 1 200~2 000 Hz 的频率范围内, 均具有优良的舱内降噪效果, 最大噪声衰减量超过 20 dB。

关键词 直升机; 舱内降噪; 微穿孔板; 吸声结构; 声场分析

中图分类号 V275.1

引言

由于旋转部件众多, 直升机舱内噪声问题严重, 不仅影响驾乘人员的乘坐舒适性, 还会诱导结构声疲劳, 缩短结构的使用寿命。直升机舱内噪声来源十分复杂, 包括旋翼系统引起的气动噪声、传动系统噪声、发动机及其辅助系统噪声、滑油散热风扇产生的噪声以及座舱内部环控系统产生的噪声^[1]。其中, 主减速器是直升机传动系统中的关键部件。齿轮啮合时产生的冲击激励引起结构振动, 通过连接撑杆传递到机体上, 引起机体结构的振动并产生舱内噪声, 其频率范围通常在 500~2 000 Hz, 具有噪声声压级大、覆盖人耳听力敏感范围的特点, 是直升机舱内噪声控制重点关注的对象^[2-3]。

目前, 直升机舱内噪声控制主要是在机舱壁板夹层中添加多孔吸声材料、蜂窝结构及阻尼材料等, 通过隔振、吸声等技术减少传播路径中的声能^[4-5]。直升机舱内声学处理通常采用安装隔声或吸声结构, 所用材料为橡胶板和泡沫等^[6-7], 该类材料对中低频噪声控制能力有限, 附加质量较大, 在一定程度上影响了直升机总体性能。

近年来, 微穿孔板 (micro-perforated panel, 简称 MPP) 作为一种新型吸声结构, 具有结构简单、重量较轻、不受材料限制、耐高温、耐腐蚀、能承受高速气

流冲击、吸声频带宽且设计性强等优点^[8-9], 已被广泛应用于建筑、道路等降噪领域^[10-14]。陈宏尚^[15]将静部件的微穿孔板吸声结构用在运动的直升机减速器面齿轮上, 形成微穿孔腹板面齿轮结构, 箱体内部噪声平均降低 2 dB 左右, 箱体外部噪声平均降低 1 dB 左右。在工程应用中, 为了降低主减速器齿轮啮合引起的直升机舱内线谱噪声, 同时满足直升机对吸声材料的尺寸和重量的要求, 有必要针对直升机舱内噪声的特点和机舱内部结构, 设计出一种轻质高效的微穿孔板吸声结构。

笔者针对主减速器齿轮啮合引起的中高频段噪声, 研究了微穿孔板吸声结构用于直升机舱内噪声抑制的可行性和有效性。

1 微穿孔板吸声结构设计方案

直升机机舱需进行隔音和吸音处理, 以获得较舒适的声学环境。直升机机舱通常采用半薄壁结构, 由外部蒙皮、纵横向骨架构成。某些民用直升机型号会加装内饰板, 其空气背腔中通过填充吸音棉进行吸声处理。直升机机舱壁板结构如图 1 所示。

根据直升机机舱内部结构特点, 可以进行如下改造: 利用原有的空气背腔以及内饰板, 将内饰板改进成微穿孔板; 无内饰板的机型则可通过加装微穿

* 国家重点研发计划资助项目 (2021YFB3400100)

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2022-03-08

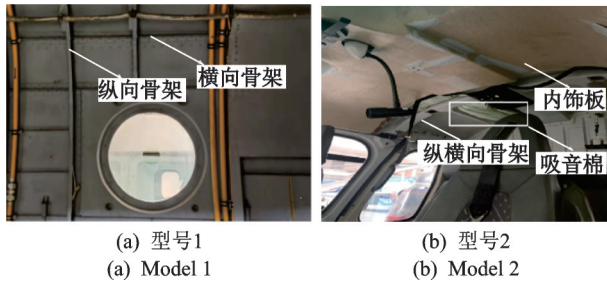


图1 直升机机舱壁板结构

Fig.1 Helicopter cabin wall panel structure

孔板,构成微穿孔板吸声结构,在保证重量要求的前提下有效抑制舱内噪声。

微穿孔板吸声结构示意图如图2所示,主要由微穿孔板、空气背腔和机舱外部蒙皮组成。由于微穿孔板材料性质对吸声效果影响不大,为减轻重量,通常采用高分子材料制成。在薄板上穿以直径小于1 mm的微孔,穿孔率一般为0.5%~5%,与后部留有一定厚度的空气背腔和刚性蒙皮壁板构成微穿孔板吸声结构。由于一般单孔径微穿孔板吸声结构的吸声效果很难覆盖设计要求的频带范围,因此可以组合2种或2种以上不同孔径或穿孔率的微穿孔板,构成组合微穿孔板吸声结构,可有效拓宽吸声频带。

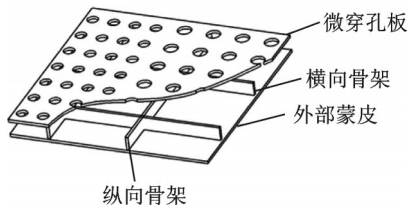


图2 微穿孔板吸声结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the sound absorption structure of the MPP

2 吸声系数数学模型

吸声系数是评价微穿孔板吸声结构吸声性能的重要指标,本研究基于声电类比法,以单个普通微穿孔板吸声结构为基础,推导出组合微穿孔板吸声结构在扩散声场中的吸声系数表达式。

2.1 普通微穿孔板吸声结构数学模型

图3为单个普通微穿孔板吸声结构示意图。根据经典微穿孔板理论^[16],经末端修正后的微穿孔板相对声阻 r 和相对声质量 m 为

$$r = \frac{32\mu}{pc} \frac{t}{d^2} \left[\sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{x}{t} \right] \quad (1)$$

$$m = \frac{t}{pc} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + \frac{x^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \quad (2)$$

其中: $x = d \sqrt{\frac{f}{10}}$,为微穿孔板常数; d 为微孔直径; t 为板厚; μ 为空气黏滞系数; p 为穿孔率; c 为空气中的声速。

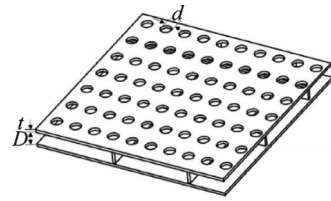


图3 单个普通微穿孔板吸声结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of sound absorption structure of single normal MPP

微穿孔板的相对声阻抗 z 为

$$z = Z_1 / \rho c = r + j\omega m \quad (3)$$

其中: Z_1 为单个微孔的声阻抗率; ρ 为空气密度; ω 为角频率。

微穿孔板后部空气背腔的相对声阻抗 z_d 为

$$z_d = \frac{Z_D}{\rho c} = -j \cot \frac{\omega D}{c} \quad (4)$$

其中: D 为板后空气背腔厚度。

微穿孔板吸声结构的相对声阻抗可表示为

$$z + z_d = r + j(\omega m - \cot \frac{\omega D}{c}) \quad (5)$$

在声波正入射条件下,微穿孔板吸声结构的吸声系数 α' 为

$$\alpha' = \frac{4r}{(1+r)^2 + \left(\omega m - \cot \frac{\omega D}{c} \right)^2} \quad (6)$$

在共振频率 f_0 处,最大吸声系数 α_0 为

$$\alpha_0 = 4r / (1+r)^2 \quad (7)$$

此时,共振频率 f_0 满足

$$2\pi f_0 m - \cot \frac{2\pi f_0 D}{c} = 0 \quad (8)$$

2.2 组合微穿孔板吸声结构数学模型

图4为组合微穿孔板吸声结构示意图。该吸声结构是由 n 个参数不同的普通微穿孔板吸声结构单元拼接组成。经过声电类比后,组合微穿孔板吸声结构相当于 n 个参数不同的普通微穿孔板吸声结构

并联组成。根据组合微穿孔板理论^[17],在扩散声场中,当声波与板面的法线方向成 θ 角入射时,组合微穿孔板吸声结构的相对声阻抗 Z 为

$$Z = \left\{ \sum_{i=1}^n [r_n \cos \theta + j\omega m_n \cos \theta - j \cot(\omega D_n \cos \theta / c)] \right\}^{-1} \quad (9)$$

其中: n 为吸声结构单元的个数; r_n 为第 n 个吸声结构单元的声阻; m_n 为第 n 个吸声结构单元的声质量; D_n 为第 n 个吸声结构单元的背腔深度; c 为空气中的声速; ω 为角频率。

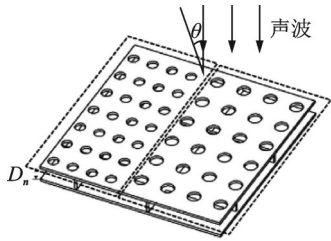


图4 组合微穿孔板吸声结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of sound absorption structure of combined MPP

将每个普通微穿孔板吸声结构吸声单元的相对声阻和相对声质量代入式(9)中,即可得到组合微穿孔板吸声结构的相对声阻抗。组合微穿孔板吸声结构的吸声系数 α 为

$$\alpha = \frac{4\text{Re}(Z)}{(1 + \text{Re}(Z))^2 + (\text{Im}(Z))^2} \quad (10)$$

3 模型直升机舱内声场仿真

3.1 仿真对象

选取模型直升机机舱进行声场仿真研究。直升机模型及其模拟机舱示意图如图5所示,机身长、宽、高分别为2 065,580和564 mm。该模型基于某轻型

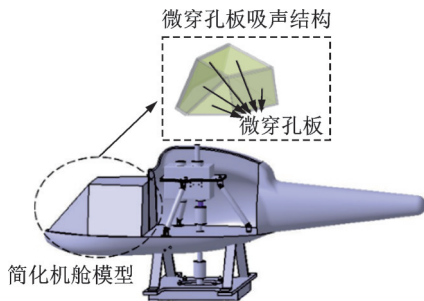


图5 直升机模型及其模拟机舱示意图

Fig.5 Schematic diagram of the helicopter model and its simulated cabin

直升机外形和减速器布置形式设计,机身结构由起落架支撑,并固定在台体结构上。为减小加工难度,将机舱简化成多面体构型,微穿孔板固定在直升机机舱壁板上,留有适当厚度的空气背腔,形成吸声结构。通过设计合理的结构参数,调整微穿孔板吸声结构的共振频率和吸声频带,以获得更好的降噪效果。

3.2 主减速器振源模拟

为了更加真实地模拟主减速器引起的直升机舱内噪声,根据模型直升机驾驶舱内主减速器物理参数,使用COMSOL Multiphysics 5.5有限元软件构建了主减速器动力学模型,如图6所示。主减速器模型的长、宽、高分别为250,160和180 mm,减速器内部包括2副齿轮对,主动轮齿数为60和32,从动轮齿数为80和40,传动比为4/3。

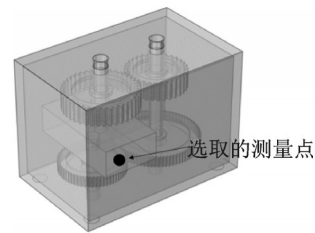


图6 主减速器动力学模型

Fig.6 Dynamics model of main gearbox

在多体动力学物理场中,对主减速器动力学模型进行瞬态响应计算,在一级主动轮外壳体上选取1个测量点,测得0~2 000 Hz频率范围内的数据。主减速器壳体平均加速度响应曲线如图7所示。可以看出,当动力输入轴转速为900 r/min时,500~2 000 Hz频率范围内主减速器产生的齿轮啮合频率及其谐波频率主要分布在720,900,1 080,1 440和1 800 Hz^[18]。根据齿数和转速可以得出该主减速器内部齿轮啮合频率为360和900 Hz,其产生的谐波频率为720,1 080,1 440和1 800 Hz,与仿真结果相

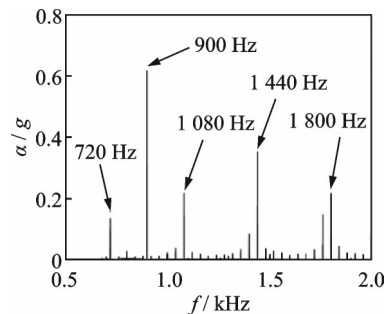


图7 主减速器壳体平均加速度频响曲线

Fig.7 Average acceleration response curve of main gearbox housing

吻合,这表明该主减速器动力学模型能够较好地模拟出直升机减速器的振动激励环境。

通过撑杆将主减速器模型与机舱模型进一步组合,在主减速器振动激励的条件下,在多体动力学物理场中仿真计算出模型机舱的动力学响应,用于后续压力声学物理场的声场仿真计算。图 8 为模型直升机有限元模型。模型中使用的网格类型为自由四面体网格单元,由于本研究分析的最高频率为 2 kHz,网格单元尺寸要求不大于波长的 1/6,因此网格单元的尺寸设定为 28 mm。在起落架底部施加固定约束,设定主减速器输入轴转速为 900 r/min,主减速器输出轴扭矩为 6 N·m。

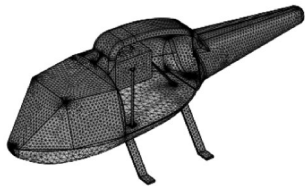


图 8 模型直升机有限元模型
Fig.8 Finite element model of model helicopter

3.3 微穿孔板吸声结构设计

当模型直升机主减速器输入转速为 900 r/min 时,内部齿轮啮合基频为 360 和 900 Hz,在 500~2 000 Hz 范围内的谐波频率包括 720,1 080,1 440 和 1 800 Hz。根据微穿孔板吸声结构参数影响规律^[19],结合模型直升机机舱实际情况和设计频率,选取合适的板厚和背腔深度,通过共振频率公式计算选取合适的孔径和穿孔率。笔者设计的微穿孔板吸声结构参数如表 1 所示。其中:1 号板和 2 号板为单孔径普通微穿孔板;3 号板为组合微穿孔板,是将 1 号板和 2 号板并联而成,用以拓宽吸声半频带。

表 1 微穿孔板吸声结构设计参数

Tab.1 Design parameters of sound absorption structure of sample MPP				
序号	孔径/mm	板厚/mm	背腔深度/mm	穿孔率/%
1 号板	0.5	1	20	1.0
2 号板	0.4	1	20	2.5
3 号板	0.5/0.4	1	20	1/2.5

利用理论模型计算得到 3 种微穿孔板吸声结构在正入射情况下的吸声系数曲线。吸声系数频谱图如图 9 所示。可以看出:1 号板的半频带覆盖频率为 720 和 1 080 Hz,共振频率在 900 Hz 左右;由于 2 号板较 1 号板孔径减小,穿孔率增加,微穿孔板的声质

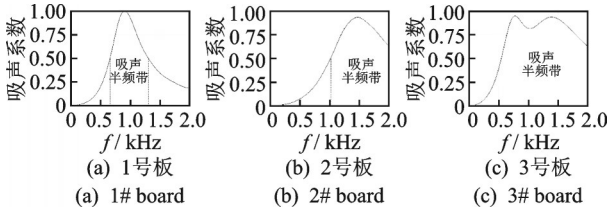


图 9 吸声系数频谱图
Fig.9 Sound absorption coefficient spectrogram

量减小,微穿孔板吸声结构的声阻抗与空气特性阻抗匹配较好,使得吸声半频带有所拓宽,半频带覆盖频率为 1 440 和 1 800 Hz,同时随着穿孔率的增加,共振频率右移,2 号板共振频率在 1 500 Hz 左右;3 号板将 1 号、2 号板组合,共用同一空气背腔,吸声半频带大大拓宽,半频带覆盖 500~2 000 Hz 范围内的基频和倍频;吸声系数出现 2 个吸收峰值,处于原有 2 块板的吸收峰附近,2 个吸收峰频率之间因声抗符号相反,两者互相影响,不会产生较深的低谷,吸声性能显著提升。

3.4 模型机舱声场仿真

为进行对比验证,分别针对机舱壁板安装微穿孔板吸声结构与不安装微穿孔板吸声结构的情况,进行舱内声场仿真计算,得出机舱内的声压级分布,来分析微穿孔板吸声结构的舱内降噪特性。

根据振源模拟仿真得到壁板在真实减速器齿轮啮合条件下的振动响应,在压力声学物理场中,通过广义拉伸算子(数值从源端映射到目标端)将机舱背板与底板的振动加速度响应作为噪声辐射声源。模型机舱示意图如图 10 所示。模型直升机机舱由外部蒙皮、内饰板和作为辐射源的背板、底板构成。模型内 4 个球体域用来模拟驾乘人员的人耳位置,从而测量舱内典型位置处的噪声信号。将内饰板处安装和未安装微穿孔板吸声结构 2 种情况进行对比,分析安装微穿孔板吸声结构的舱内降噪特性。

通过压力声学频域仿真分析,得到了舱内 4 个典型测量点的声压级数据,并进行加权平均计算。

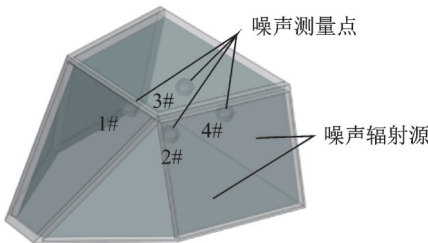


图 10 模型机舱示意图
Fig.10 Schematic diagram of model of cabin

直升机舱内平均声压级频响曲线如图11所示。可以看出,舱内安装微穿孔板吸声结构后,4个测点的平均声压级在目标频段内均有不同程度的衰减。安装1号板的舱内平均声压级在720,900和1080 Hz处分别衰减了10,30和15 dB;安装2号板的舱内平

均声压级在1440和1800 Hz处分别衰减了30和17 dB;安装3号板的舱内平均声压级在720,900,1080,1440和1800 Hz处分别衰减了10,30,20,30和16 dB。因此,3种微穿孔板吸声结构在其设计控制的谐波范围内均具有良好的舱内降噪效果。

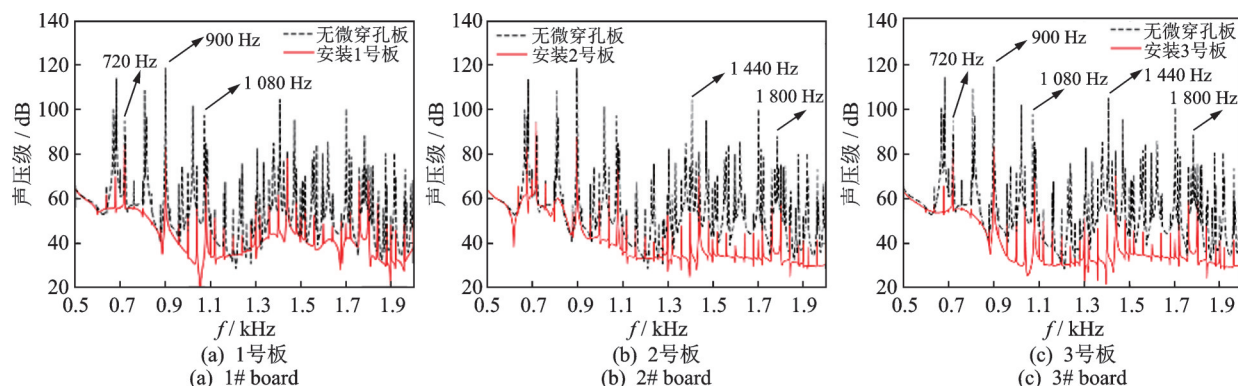


图11 直升机舱内平均声压级频响曲线

Fig.11 Average frequency response curve of sound pressure level in helicopter cabin

安装1号板和2号板的舱内平均声压级在其吸声半频带的吸声效果优于其他频段,安装3号板的吸声半频带由于组合结构的效应大大拓宽,能够覆盖啮合频率及其谐波频率的范围,而其吸声效果没有明显减弱。3种微穿孔板吸声结构在1400~2000 Hz内均具有良好的降噪效果,这是因为在扩散声场中声波入射角度的不同,使得微穿孔板吸声结构的共振峰向高频延伸1个倍频程左右^[20],其中2号板和3号板所设计的共振峰在此频段范围内,降噪效果更为明显。

4 模型直升机舱内声场试验

为进一步验证微穿孔板吸声结构用于直升机机舱的降噪效果,在具有完整动力装置、传动系统和机体结构的模型直升机内开展试验研究。图12为模型直升机实物图,包含机舱、主减速器舱和尾部结构等部分。



图12 模型直升机实物图

Fig.12 Physical map of model helicopter

4.1 试验系统

模型直升机试验系统如图13所示,主要由模型

直升机和测试硬件组成。受试验条件的限制,本次试验仅对模型机舱安装1号板进行测试,分别测量分析主减速器壳体振动水平和模型机舱安装微穿孔板前后的舱内声场情况。

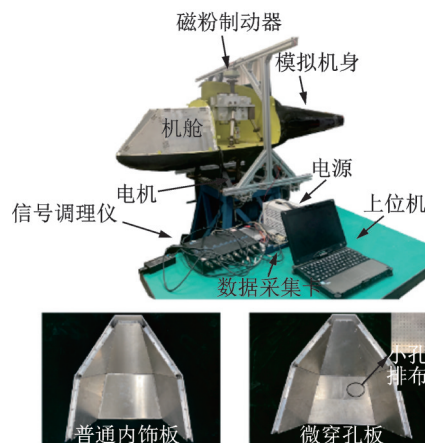


图13 模型直升机试验系统

Fig.13 Model helicopter test system

试验时电机输入转速为900 r/min,对应的啮合频率分别为360和900 Hz。主减速器通过3根撑杆与机体连接,安装在主减速器舱中。主减速器输入轴连接电机,输出轴连接磁粉制动器,用于模拟旋翼扭矩。电机旋转时带动主减速器齿轮转动,以模拟真实情况下的直升机主减速器齿轮啮合振动激励及其振动/噪声传递路径。此时,主减速器产生的激励包含结构振动和辐射噪声。试验系统设备型号及其参数如表2所示。

基于该试验系统,设定主减速器的转速为

表 2 试验系统设备型号及其参数

Tab.2 Parameters of test system equipment

设备	型号	参数	数值
磁粉制动器	PB-B2-0.6	扭矩/(N·m)	6~20
		输入电压/V	DC-24
加速度传感器	LC0119	灵敏度/(mV·g ⁻¹)	499.9
		量程/g	±10
传声器	378B11	灵敏度/(mV·Pa ⁻¹)	50
		量程/dB	146
信号调理仪	CM3508	低通截止 频率范围/Hz	1.5~10 000
数据采集器	NI USB6343	采样速率/(ks·s ⁻¹)	250

900 r/min,磁粉制动器的扭矩为 6 N·m。1个单轴加速度传感器安装在主减速器壳体上,用于获得振动加速度频谱;4个测量传声器对称分布在机舱内,用于测量舱内噪声水平。测量传感器的安装位置如图 14 所示,与仿真时的位置布置一致。

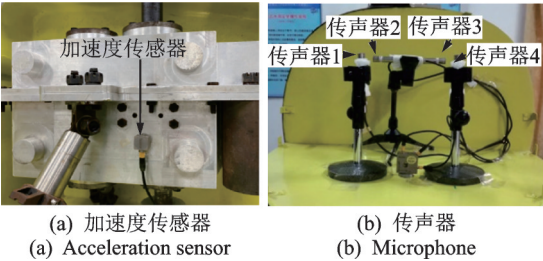


图 14 测量传感器的安装位置
Fig.14 Measuring sensor installation location

4.2 振动水平测试结果

图 15 为主减速器壳体加速度响应频谱图。可以看出,在 500~2 000 Hz 的目标频段内,主减速器产生的齿轮啮合频率及其谐波频率主要分布在 360,540,720,900,1 080,1 350,1 440 和 1 800 Hz。除了设计方案中的谐波成分,还出现了 540 和 1 350 Hz 等频率成分,这可能是由于齿轮磨损、间隙

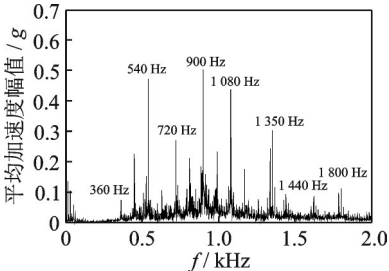


图 15 主减速器壳体加速度响应频谱图
Fig.15 Acceleration response frequency spectrum of main gearbox housing

等非线性因素导致的分频和倍频成分。

4.3 舱内噪声测试结果

4.3.1 时域分析

图 16 为传声器 1~4 处舱内噪声时间历程图。可知,在安装微穿孔板吸声结构(1号板)的情况下,舱内 4 个典型测量点处的声压值均有明显的衰减。

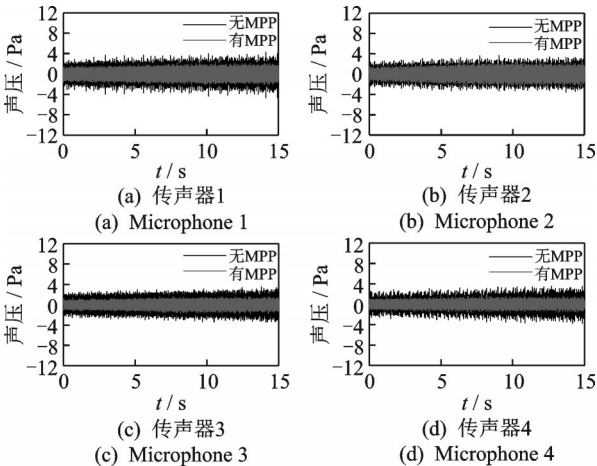


图 16 传声器 1~4 处舱内噪声时间历程图
Fig.16 Cabin noise time-domain history diagram of microphone 1~4

将 4 个测量点的声压数值换算为声压级(sound pressure level,简称 SPL)数值,测量声压级数值对比如表 3 所示。在 0~2 000 Hz 的频段内,各个测量点的 SPL 衰减幅度为 3~4 dB。进一步对噪声信号进行带通滤波(500~2 000 Hz),得到目标频段的 SPL 值,可以看出各个测量点的 SPL 衰减幅度为 6~7 dB。试验结果表明,微穿孔板吸声结构在所设计目标频段有良好的降噪效果。

表 3 测量声压级数值对比

Tab.3 Numerical comparison of measured SPL dB						
测试位置	0~2 000 Hz			500~2 000 Hz		
	无 MPP	有 MPP	衰减	无 MPP	有 MPP	衰减
传声器 1	105.8	102.8	-3.0	104.9	97.9	-7.0
传声器 2	104.8	100.4	-4.4	103.7	97.1	-6.3
传声器 3	105.1	100.7	-4.4	103.1	95.9	-7.2
传声器 4	103.3	100.2	-3.1	102.1	95.9	-6.2

4.3.2 频域分析

图 17 为传声器 1~4 处舱内噪声频谱图。可以看出:微穿孔板吸声结构在所设计的共振峰 900 Hz 附近有良好的降噪效果,且在 500~2 000 Hz 宽频范围内有一定的降噪效果,吸声半频带(700~1 300 Hz)范围效果优于其他频段;1 500~2 000 Hz 频段范围内噪声

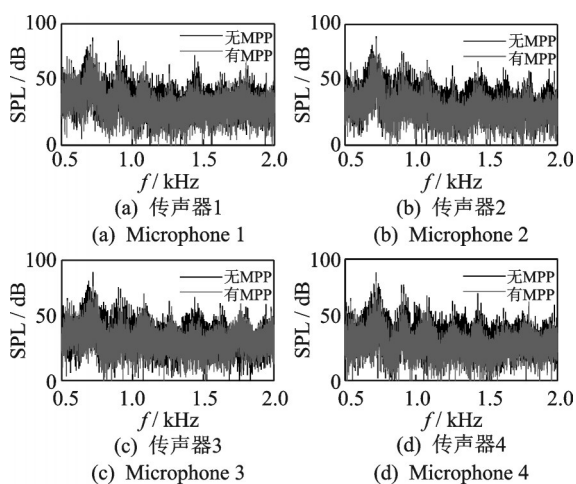


图17 传声器1~4处舱内噪声频谱图

Fig.17 Cabin noise spectrogram of microphone 1~4

衰减幅度较大,这是因为在扩散声场中,声波入射角度的不同,使得微穿孔板吸声结构的共振峰向高频延伸1个倍频程左右,与仿真结果相一致。

特定频率处测量声压级衰减值如表4所示。可以看出,在900和1440 Hz处SPL衰减幅度为7~15 dB。试验结果表明,微穿孔板吸声结构在所设计目标共振频率处有良好的降噪效果。

表4 特定频率处测量声压级衰减值

Tab.4 Measuring the SPL at a particular frequency attenuation value dB

位置	f/Hz			
	720	900	1 080	1 440
传声器1	-1.52	-12.42	-0.53	-11.26
传声器2	-0.23	-7.88	-0.21	-8.63
传声器3	-1.73	-14.33	-0.15	-10.87
传声器4	-1.28	-7.75	-1.02	-15.75

4.3.3 整体降噪水平

为了更直观地显示舱内整体降噪水平,对4个典型测量点处的SPL进行加权平均处理。微穿孔板安装前后的舱内噪声频域对比如图18所示。可

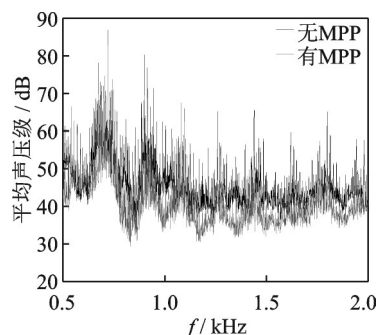


图18 微穿孔板安装前后的舱内噪声频域对比

Fig.18 Comparison of cabin noise in frequency domain before and after installation of MPP

以看出,安装微穿孔板吸声结构后,由于1号板的垂直入射共振峰在900 Hz附近,在800~1 000 Hz范围内舱内SPL值有明显衰减,900 Hz共振峰附近衰减尤为明显,衰减量在10~30 dB。因为扩散场的声波入射角度不同,微穿孔板吸声结构的共振峰向右偏移1个倍频程左右,在1 200~2 000 Hz频段范围内舱内SPL值有明显衰减,验证了仿真结果中相应频段的吸声效果。

通过对比无微穿孔板吸声结构的模型直升机舱内声场,证明用于直升机舱内壁板的微穿孔板吸声结构具有较好的宽频降噪特性,在800~1 000 Hz和1 200~2 000 Hz的宽频范围以及该范围内所有齿轮啮合谐波频率处均具有优良的舱内降噪效果,最大衰减量超过20 dB。

5 结 论

1) 本研究提出的适用于直升机舱内降噪的微穿孔板吸声结构设计方案,对中高频段主减速器的噪声具有较好的抑制效果。

2) 基于所构建的直升机主减速器/机体声振耦合有限元模型,通过仿真分析得到了微穿孔板吸声结构的舱内降噪特性。仿真结果表明,所设计的微穿孔板吸声结构可以有效降低模型直升机500~2 000 Hz范围内的舱内噪声,最大噪声衰减幅值超过30 dB。

3) 基于所搭建的模型直升机试验平台,在真实主减速器振动激励下,测试得到了安装微穿孔板吸声结构的舱内声场情况。对比无微穿孔板吸声结构的舱内声场,验证了微穿孔板吸声结构的舱内降噪特性。试验结果表明,安装微穿孔板吸声结构后,在800~1 000 Hz和1 200~2 000 Hz的宽频范围以及该范围内所有齿轮啮合谐波频率处均具有优良的舱内降噪效果,最大衰减量超过20 dB,充分验证了微穿孔板吸声结构用于直升机舱内降噪的可行性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 虞汉文,孙东红,李明强,等.直升机舱内降噪技术研究[J].直升机技术,2012(4): 38-44.
YU Hanwen, SUN Donghong, LI Mingqiang, et al. Cabin noise control process of a helicopter[J]. Helicopter Technique, 2012(4): 38-44. (in Chinese)
- [2] SZEFI J T. Helicopter gearbox isolation using periodically layered fluidic isolators[D]. Pennsylvania State, USA: The Pennsylvania State University, 2003.

- [3] MILLOTT T A, YOERKIE C A, WELSH W A, et al. Flight test of active gear-mesh noise control on the S-76 aircraft[C]// 54th Annual Forum Proceedings of the American Helicopter Society. [S.l.]: Curran Associates Inc, 1998: 241-249.
- [4] 陆洋, 马逊军, 王凤娇. 直升机舱内噪声主动控制技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(8): 38-45.
LU Yang, MA Xunjun, WANG Fengjiao. Review of active techniques for helicopter interior noise control[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(8): 38-45.(in Chinese)
- [5] 陈克安. 有源噪声控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 12.
- [6] CAILLET J, MARROT F, UNIA Y, et al. Comprehensive approach for noise reduction in helicopter cabins [J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 23(1): 17-25.
- [7] ANG L Y L, TRAN L Q N, PHILLIPS S, et al. Low-frequency noise reduction by earmuffs with flax fibre-reinforced polypropylene ear cups[J]. Advances in Acoustics and Vibration, 2018, 2018: 2057820.
- [8] 何琳, 朱海潮, 邱小军, 等. 声学理论与工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 115-118.
- [9] 敖庆波, 王建忠, 李烨, 等. 低频吸声材料的研究进展 [J]. 功能材料, 2020, 51(12): 12045-12050.
AO Qingbo, WANG Jianzhong, LI Ye, et al. Development of lower frequency sound absorption materials[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(12): 12045-12050.(in Chinese)
- [10] 查雪琴. 透明的微穿孔吸声材料改善了新建议会大厅的音质[J]. 声学技术, 1994, 13(1): 1-3.
ZHA Xueqin. Transparent micro-perforated sound-absorbing material improves the sound quality of the newly built parliament hall[J]. Technical Acoustics, 1994, 13(1): 1-3.(in Chinese)
- [11] 毛东兴, 夏峻峰, 洪宗辉. 顶部带吸声柱体的微穿孔声屏障的应用研究[J]. 声学技术, 1999, 18(1): 26-29.
MAO Dongxing, XIA Junfeng, HONG Zonghui. Study on sound barrier based on microperforated panel structure with top absorbing cylinder[J]. Technical Acoustics, 1999, 18(1): 26-29.(in Chinese)
- [12] LI L, ZHANG Z F, HUANG Q B, et al. A sandwich anechoic coating embedded with a micro-perforated panel in high-viscosity condition for underwater sound absorption[J]. Composite Structures, 2020, 235: 111761.
- [13] 吴群, 吕岩, 李耀祖, 等. STC-GV增压机隔声罩通风消声器声学性能仿真研究[J]. 机械, 2021, 48(6): 8-13, 19.
WU Qun, LÜ Yan, LI Yaozu, et al. Simulation study on acoustic performance of ventilation muffler of STC-GV supercharger[J]. Machinery, 2021, 48(6): 8-13, 19.(in Chinese)
- [14] LEE W Y, KIM J C, NOH H M. Application of a micro-perforated panel absorber to reduce the curve squeal noise of railways[J]. Noise Control Engineering Journal, 2021, 69(6): 507-517.
- [15] 陈宏尚. 基于亥姆霍兹理论的微穿孔腹板面齿轮传动降噪方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [16] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, 22(5): 385-393.
MA Dayou. General theory and design of microperforated-panel absorbers [J]. Acta Acustica, 1997, 22(5): 385-393.(in Chinese)
- [17] 马大猷. 组合微穿孔板吸声结构[J]. 噪声与振动控制, 1990, 10(3): 3-9.
MA Dayou. Combined micro-perforated panel sound-absorbing structure [J]. Noise and Vibration Control, 1990, 10(3): 3-9.(in Chinese)
- [18] LU Y, WANG F J, MA X J. Helicopter interior noise reduction using compounded periodic struts[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 435: 264-280.
- [19] 王卫辰, 邢邦圣, 顾海霞, 等. 微穿孔板几何参数估算及其对吸声性能的影响[J]. 声学学报, 2019, 44(3): 369-375.
WANG Weichen, XING Bangsheng, GU Haixia, et al. Estimation of geometric parameters for micro-perforated panels and their effect on absorption performance [J]. Acta Acustica, 2019, 44(3): 369-375.(in Chinese)
- [20] 刘克, NCOCKE C, 马大猷. 扩散场内微穿孔板吸声特性的实验研究[J]. 声学学报, 2000, 25(3): 211-218.
LIU Ke, NCOCKE C, MA Dayou. Experimental investigation on sound absorption characteristics of micro-perforated panel in diffuse fields [J]. Acta Acustica, 2000, 25(3): 211-218.(in Chinese)



第一作者简介:李程磊,男,1998年10月生,硕士生。主要研究方向为直升机振动与噪声控制。

E-mail: lichenglei@nuaa.edu.cn

通信作者简介:陆洋,男,1977年7月生,博士、教授。主要研究方向为直升机动力学与控制。

E-mail: luyang@nuaa.edu.cn