文章编号：1006-1355(2021)01-0133-07

基于声品质的直升机舱内典型降噪措施分析

邓云云，陈克安，王 雪，张 珺

（西北工业大学 航海学院 环境工程系，西安 710072）

摘 要：直升机舱内噪声严重降低了乘员的乘坐舒适性，进行直升机舱内降噪设计研究十分必要。本文以声品质最优为目标，以直升机舱内噪声烦恼度评价结果为依据，通过多元线性回归方法构建舱内声品质模型，利用计算声学软件模拟直升机舱内添加不同种类降噪措施后的双耳可听声信号，从不同角度对典型降噪措施的效果进行测评及对比分析。结果表明：在舱内添加穿孔板（穿孔率13 %，空腔厚0.5 m，前部填充0.1 m岩棉）后的声品质改善效果最好，添加毛毡乳胶粘合泡沫橡胶和5 mm厚针刺毡对声品质的改善效果最差。从吸声措施类型来看，吸声结构对声品质的改善效果最好，吸声材料次之，阻尼材料最差。

关键词：声学；声品质；典型降噪措施；直升机舱内噪声；烦恼度

中图分类号：TB533^{+}.1 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.025

Analysis of Typical Noise Reduction Measures in a Helicopter Cabin Based on Sound Quality

DENG Yunyun, *CHEN Kean*, *WANG Xue*, *ZHANG Jun*

(School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract : The helicopter cabin noise seriously reduces the ride-comfort of passengers, so it is necessary to study the design of noise reduction in the helicopter cabin. This thesis aims at the sound quality optimization, and uses multiple linear regressions to build a sound quality model based on the evaluation of noise annoyance in the helicopter cabin. The binaural audible signals in the case of adding 12 typical noise control measures in the helicopter cabin are obtained by use of the acoustical software and used to evaluate and compare the effects of the 12 typical noise control measures from different aspects. The results show that adding perforated plates with perforation rate 13 %, 0.5 m thick cavity and 0.1 m thick mineral wool at the front of the cabin is the best measure for the sound quality improvement; while adding the foam rubber with carpet and latex backing attached and 5 mm-thick needle felt only has the poor effect for the sound quality improvement. From the viewpoint of the type of sound absorption measures, the sound absorption structure has the best improvement effect of the sound quality, followed by the sound absorption material and the damping material.

Key words : acoustics; sound quality; typical noise control measures; helicopter cabin noise; annoyance

直升机舱内突出的噪声问题严重地影响了乘坐舒适性[1]，进行直升机舱内降噪十分迫切。现有研究多集中于直升机振动控制方面，从声品质的角度分析直升机舱内降噪措施方面仍少有研究。传统的直升机舱内噪声研究，一般以等效连续A声级为评价标准，虽然它在一定程度上建立了人耳感知与客观声压级之间的联系[2]，但仍不符合人们的期望。近年来迅速发展的声品质技术已从乐器、厅堂音质等领域拓展到车辆、飞机、交通噪声等领域[3-8]，从声品质的角度研究直升机舱内噪声已势在必行。

目前大部分针对噪声声品质的研究均是通过针对不同产品分析其噪声特性、进行声品质主观评价实验、通过客观评价指标解释声品质主观实验结果、建立声品质模型这样的流程来进行的[5-6]。但是少有人研究过针对直升机的各种降噪措施与噪声声学特征参量及心理声学参量之间的对应关系，在综合考虑直升机舱室降噪设计和声品质评价方面的研究基本处于空白。本文利用直升机舱内噪声声品质评价模型对不同典型降噪措施进行多角度分析，寻找影响声品质的各种因素。

首先通过主观评价实验及数据分析获得可靠的直升机舱内噪声烦恼度评价结果，并通过多元线性

收稿日期：2020-05-14

基金项目：直升机舱内噪声控制技术研究（MJ-2015-F-044）

作者简介：邓云云（1991－），女，陕西省宝鸡市人，博士研究生，主要研究方向为声品质评价研究。

通信作者：陈克安，男，教授，博士生导师。

E-mail: kachen@nwpu.edu.cn

回归构建声品质预测模型，接下来利用ODEON软件获得直升机舱内添加12种典型降噪措施情况下的双耳可听声信号，最终从不同角度对典型降噪措施的效果进行测评并对比分析，获得最优的典型降噪措施。

1 主观评价实验及烦恼度建模

1.1 声样本

为了获得具有代表性的直升机舱内噪声样本，本文选取三种型号的直升机，分别为机型A、B和C，其舱内噪声均为实测。机型A选取了8个测点位置，模拟乘客坐在座位上双耳的高度，机型B选取了8个测点位置，机型C选取了15个测点。分别在不同工况下进行采集，共获得了87个声样本。对于稳态噪声，一般情况下，用于主观评价的样本时长为5 s较为合适，因此将所有声样本截取为5 s的片段，并进行时频分析。87个声样本与机型工况的对应如表1所示。

表1 样本序号分布情况

机型A	样本序号	机型B	样本序号	机型C	样本序号
开车	1～8	开车	49～56		
爬升	9～16				
下降	17～24	巡航	57～64	巡航	73～87
悬停	25～32				
巡航1	33～40	悬停	65～72		
巡航2	41～48				

1.2 主观评价实验

目前，使用烦恼度作为中低强度稳态噪声作用下人群心理感知的描述词已经得到了广泛认可[9–10]，本文选择参考评分法获取直升机舱内噪声烦恼度评价值。此外，预实验表明，选择9级评价尺度（如表2所示）较为合适。

烦恼度评价实验中选取87个噪声样本进行。招募24位被试，均为在校大学生以及研究生，年龄在20～30岁之间，男女比例为5:7。所有被试的耳科状况均正常，测试期间无感冒不适等症状。

实验前由主试讲解实验目的、流程、注意事项等，并选取具有代表性的16个声样本播放给被试，进行评价人员训练。在正式实验时，将所有声样本随机排序，将87对声音重复播放两次，一共进行174次参考评分。每次评价时间控制在20 min以内，休息10 min后继续。实验共进行1.5 h。实验通过问卷星软件进行，在手机端作答。

1.3 评价结果分析

根据回收的24份问卷从以下四个方面对实验数据进行有效性检验，分析结果如图1所示。

（1）聚类分析。首先对被试评价数据进行聚类分析，除21号和24号被试各自为一类之外，其余被试均聚为一类，说明21号和24号被试在进行烦恼度评分时可能采用了与大多数人不同的策略，因此予以剔除。

（2）评价范围。若某个被试对所有声样本的两次评分结果均在3～7之间，则认为该被试在评价过程中没有采用与其他人一致的评价尺度，因此评价数据无效，予以剔除。经检验，24名被试中只有21号被试不符合要求，予以剔除。

（3）误判分析。对经聚类分析剔除后的被试评价数据进行误判分析。4、5、7、15号被试的误判率大于0.35，因此剔除该被试。剔除后的平均误判率为0.19，数据可信度较高。

（4）相关分析。对每个评价者两次评价结果做相关分析，大部分被试评价结果的相关系数都较高，说明大部分评价者在评价过程中评价尺度相对稳定。实验中，一般要求相关系数达到0.6，因此将3号被试剔除。剔除后平均相关系数0.71，数据可信度较高。

剔除无效被试后，最终共获得17名有效被试烦恼度评价结果。绘制了烦恼度评分的均值图，如图1所示。从整体来看，烦恼度评分机型C>机型A>机型B。机型A不同工况的烦恼度评分比较接近，各个测点在不同工况下变化比较一致；机型B的巡航工况烦恼度评分比较低，开车工况评分稍高，悬停工况评分差距比较悬殊；机型C只有巡航工况，评分较为平均。

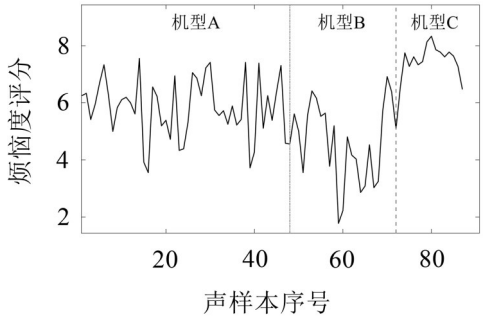


图1 烦恼度评分均值

表2 烦恼度9级评价尺度

不烦恼	特别	相当	比较	有点	相同	有点	比较	相当	特别	烦恼
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

1.4 烦恼度模型

根据飞机噪声烦恼度影响因素分析结果[11]，选取响度（用L表示）、尖锐度（用S表示）、粗糙度（用R表示）、波动强度（用FL表示）为自变量。以被试的烦恼度得分均值为因变量，采用多元线性回归方法建立了直升机舱内噪声烦恼度的多元线性回归模型。取所有声样本烦恼度评分均值的80 %用于实验，20 %用于检验。烦恼度得分的多元线性回归模型见式（1）。

$$A_{ols} = -2.673 + 0.212L + 0.044S + 1.073R - 26.202FL \tag{1}$$

式中：A_{ols}——烦恼度；L——响度；S——尖锐度；R——粗糙度；FL——波动强度。

方程的可决系数R^2为0.865，相对误差为6.8 %，标准误差为0.481，说明模型准确度很高，回归方程能较好地解释因变量。计算四个自变量所占权重分别为：86.3 %、0.72 %、8.92 %、4.06 %，它们与烦恼度评分的相关系数分别为：0.998 8、0.245 5、0.635 1、0.625 7，可以看出响度是影响烦恼度评分最重要的因素，其次是粗糙度和波动强度，而尖锐度对烦恼度评分的影响很小。

将预留的烦恼度主观评分数据，与通过多元模型计算的烦恼度数值进行对比，验证烦恼度模型。实验真值和模型预测值之间的相关系数为0.929 8，说明这个模型对于不同工况、不同机型的直升机舱内噪声具有较好的有效性和适用性。

2 直升机模拟舱内声场仿真及可听化

2.1 模拟舱声场仿真及可视化

为了实现宽频带范围内的声场仿真，本文利用声线跟踪法[12–14]进行模拟舱内不同降噪措施条件下的声场计算，采用的软件为以声线跟踪法为核心算法的ODEON。在进行舱内声信号可听化时，采用直升机实测噪声为干信号（即初始源信号）。首先使用ODEON自带的房间编辑器完成直升机模拟舱的模型建立。声源被设置在直升机模拟舱顶部中心位置，距离舱内天花板0.05 m，声源类型为单极子声源，指向性为-90°（垂直向下）以此来模拟直升机的主要噪声来源——螺旋桨。设置8个接收点，声源和接收点位置示意图如图2所示。

ODEON软件的材料声学属性均通过倍频程上的吸声系数来体现，倍频程范围为63 Hz～8 kHz。根据模拟舱的实际情况对材料作以下默认设置：将驾驶室前方的5个面和侧面的4个窗户设置为玻璃；将地板设置为木质地板。

选取阻尼材料、吸声材料、吸声结构这三大类无源降噪措施，并选择ODEON材料库中较为常见且吸声系数在不同频段各不相同的12种典型降噪措施，以用于敷设在模拟舱天花板以及其余壁面，并分别计算直升机模拟舱双耳脉冲响应（BRIR）。材料设置如表3所示。

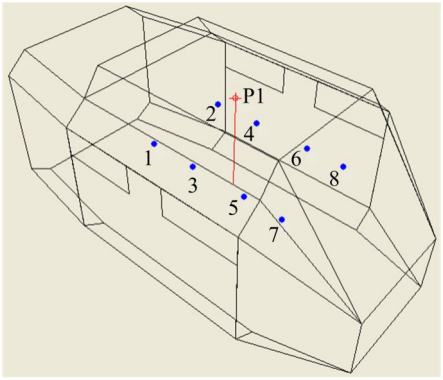


图2 声源及接收点位置示意图
（点1～8为接收点，点P1为声源）

表3 典型降噪措施材料设置

材料类型	序号	材料设置
阻尼材料	1	5 mm厚针刺毡
	2	1.9 cm厚矿物纤维涂层
	3	毛毡乳胶粘合泡沫橡胶
吸声材料	4	9 mm厚簇绒毛毡
	5	帆布罩
	6	5 cm厚皮革覆盖软棉垫
	7	5 cm厚岩棉（未处理表面）
	8	2.5 cm厚吸声棉
吸声结构	9	5.5 cm厚微孔砖（23 %穿孔率，空腔内填充5 cm厚岩棉）
	10	玻璃纤维毛毯，2.54 cm厚玻璃棉夹层
	11	穿孔板（穿孔率13 %，空腔厚5 cm，填充5 cm岩棉）
	12	穿孔板（穿孔率13 %，空腔厚0.5 m，前部填充0.1 m岩棉）

各项参数设置完成后，经过计算可得到12种不同降噪措施条件下的直升机模拟舱双耳脉冲响应（BRIR）。然后将得到的模拟舱双耳脉冲响应与实测的直升机噪声信号进行卷积，从而实现可听声信号的合成。

2.2 模拟舱声场仿真实验验证

选取模拟舱的地面开车状态作为测量工况，并选取较容易获取的8号措施作为验证，即2.5 cm厚的吸声棉，其倍频程吸声系数与仿真所设置的相同。并分别在不添加吸声棉和添加吸声棉的情况下进行测量。实验的8个测点位置与收集噪声样本时保持

相同，获得了16个声样本。

对采集到的声样本进行分析，然后将不添加吸声棉情况下模拟舱内对应测点的声样本作为干信号与文中得到的8号措施情况下的模拟舱双耳脉冲响应进行卷积，从而得到了双耳可听声信号。其中四个测点的倍频程A声级仿真预测值和实际测量值的对比如图3所示。

由图3可以看出，在各个测点上，仿真预测值和实际测量值的倍频程A声级在250 Hz以下频段内误差较大，最大误差达6.15 dB(A)（在31.5 Hz处产生），原因在于ODEON软件是以声线跟踪法为核心算法的，而根据模拟舱的大小估算，该方法的适用频段为250 Hz～8 kHz[15]。而在250 kHz～8 kHz频段内各个测点的误差均在2 dB(A)以内，准确性很高。总的来说，ODEON软件的预测精度较高，在中高频段适用于直升机舱内噪声预测，在低频段误差也可接受，可以进行下一步分析。

基于上述分析，采用三种直升机机型在巡航工况下实测的噪声作为干信号，将干信号分别与12种不同典型降噪措施条件下的双耳脉冲响应进行卷积，最终获得了三种直升机机型巡航工况下，12种不同降噪措施条件的36段直升机舱内可听声信号，以用于后续分析。

3 结果与分析

下面分别从线性计权声级、A计权声级、心理声学参量及烦恼度评分这4个角度详细讨论直升机舱内不同典型降噪措施对声品质的优化效果。

3.1 线性计权声级和A计权声级

首先计算了三种机型在12种典型降噪措施情况下的线性计权等效连续声级和A计权等效连续声级。图4所示为12种典型降噪措施的倍频程吸声系数柱状图。

降噪前后对比结果如图5所示，其中虚线为降噪前声样本的声级。结合图4和图5可知：

① 线性计权声级：三种机型规律一致，12号措施效果最好，3号措施效果最差，5、6、9、12号措施均在低频段（125 Hz以下）具有较好的吸声能力（吸声系数均高于0.4），而其他措施在低频段吸声性能均不优秀，由此可以得出结论：低频吸声性能良好的材料对线性计权声级的降噪效果明显。

② A计权声级：对于机型A、B来说，5号措施的降噪量最大，但与2号和11号措施差别很小；3号措施的降噪量最小，可能是由材料自身特性引起的。对于机型C来说，12号措施的降噪量最大而1号措施效果最差，原因在于12号为穿孔板，属于吸声结构类，因此对线谱多的机型C效果显著；且机型C机舱结构可能与机型A、B不同，因此规律不同。由此可得出结论：不同频段的吸声能力高低对于A计权声级来说影响不大，总体来说在中低频吸声性能好的材料降噪量更高一些，影响A计权声级的主要因素为材料自身特性和直升机舱内噪声特性。

3.2 心理声学参量及烦恼度

下面根据主观评价结果，分析12种典型降噪措施对各心理声学参数及烦恼度的影响。使用双耳烦

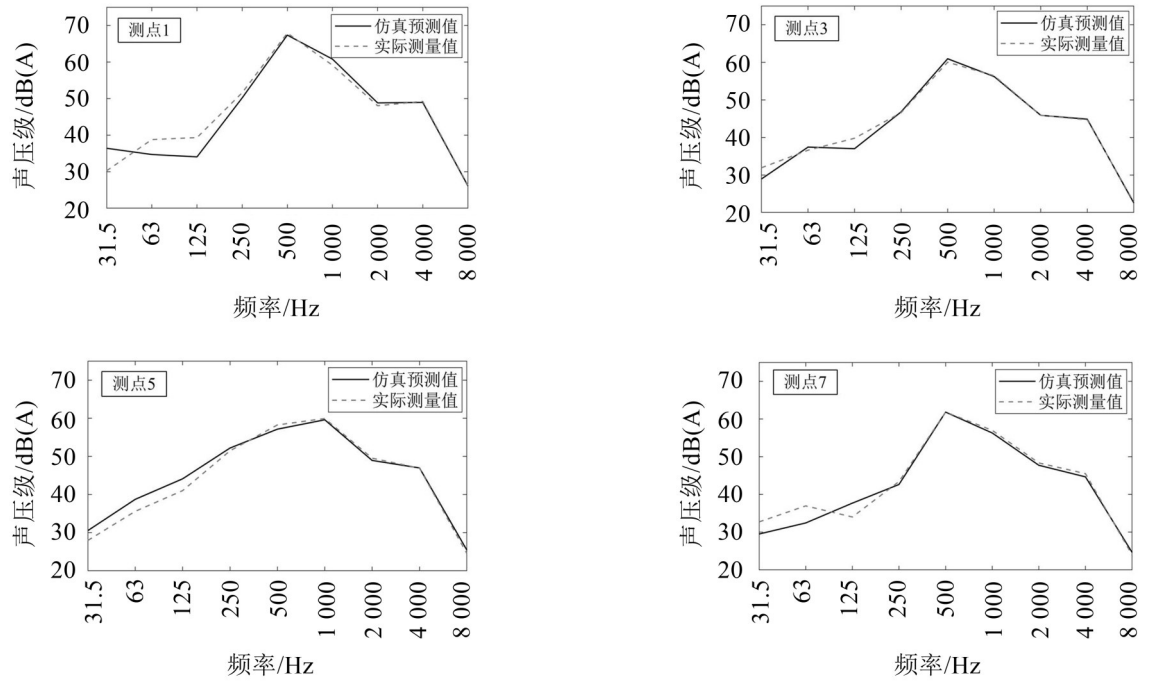


图3 仿真预测值和实际测量值的倍频程A声级对比

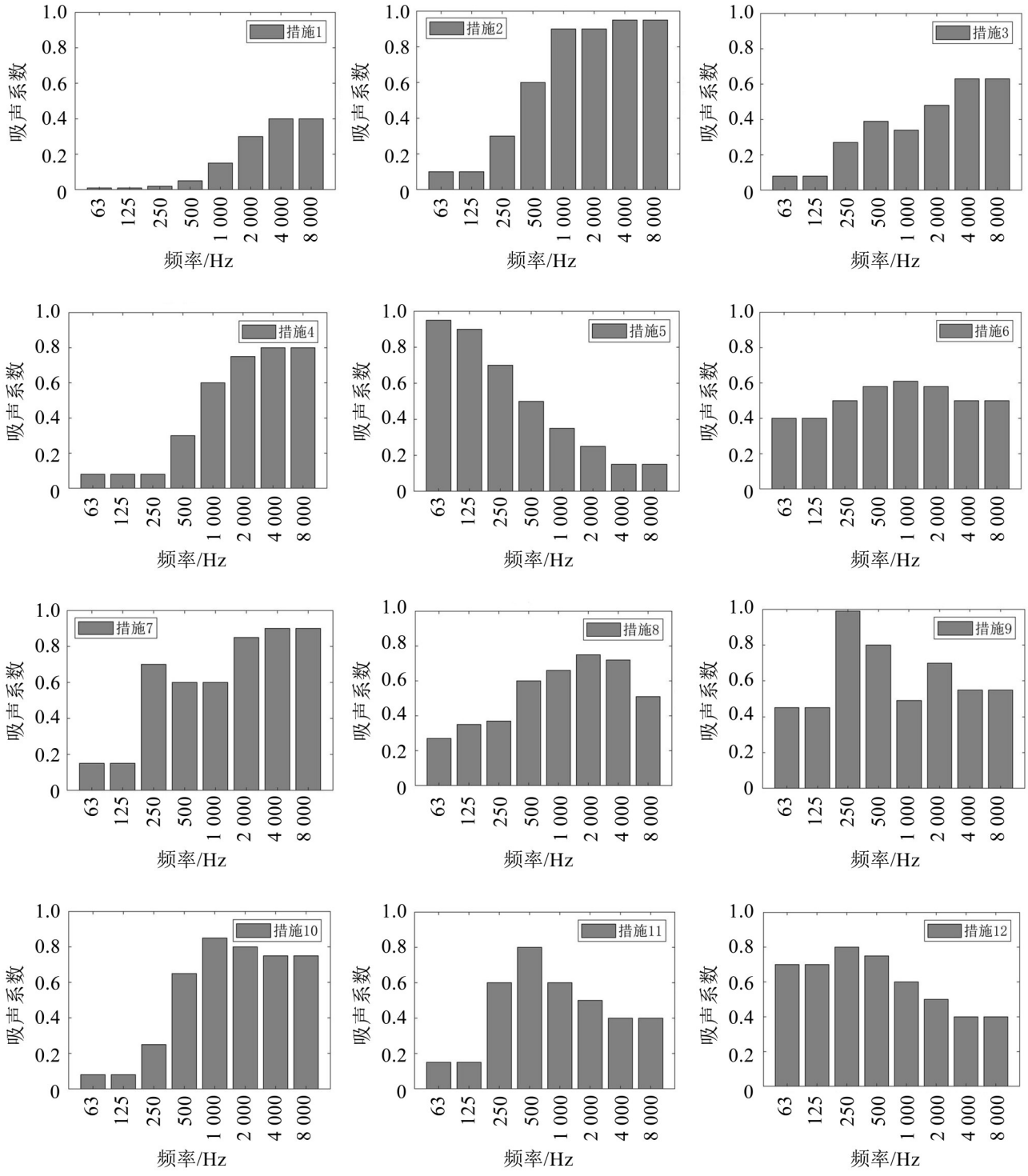


图4 典型降噪措施倍频程吸声系数

恼度的算数平均值作为最终的噪声烦恼度值。

表4至表6分别展示了机型A、B、C降噪前后的心理声学参数及烦恼度差值。

分析表4可知：①12号措施对机型A烦恼度的改善效果最好，3号措施对烦恼度的改善效果最差。②可以看出，烦恼度的改善效果基本由响度决定的，虽然降噪后使得尖锐度、粗糙度有所上升，会导致烦恼度提高，但幅度较小，总体还是降低了烦恼度。③对照各种措施的吸声系数，发现并不完全是吸声能力越好的措施其声品质改善效果就越好，虽然大致相符，但是材料自身特性影响更大。

从表5可看出，12种典型措施对机型B烦恼度的改善规律与机型A大致相似，略有不同。12号措施的烦恼度改善效果最好，3号措施的烦恼度改善效果最差；但9号措施对机型B的效果比对机型A的更好。

对于机型C而言，表6所示的结果与机型A、B相比，差异较多。12种措施大部分都降低了机型C

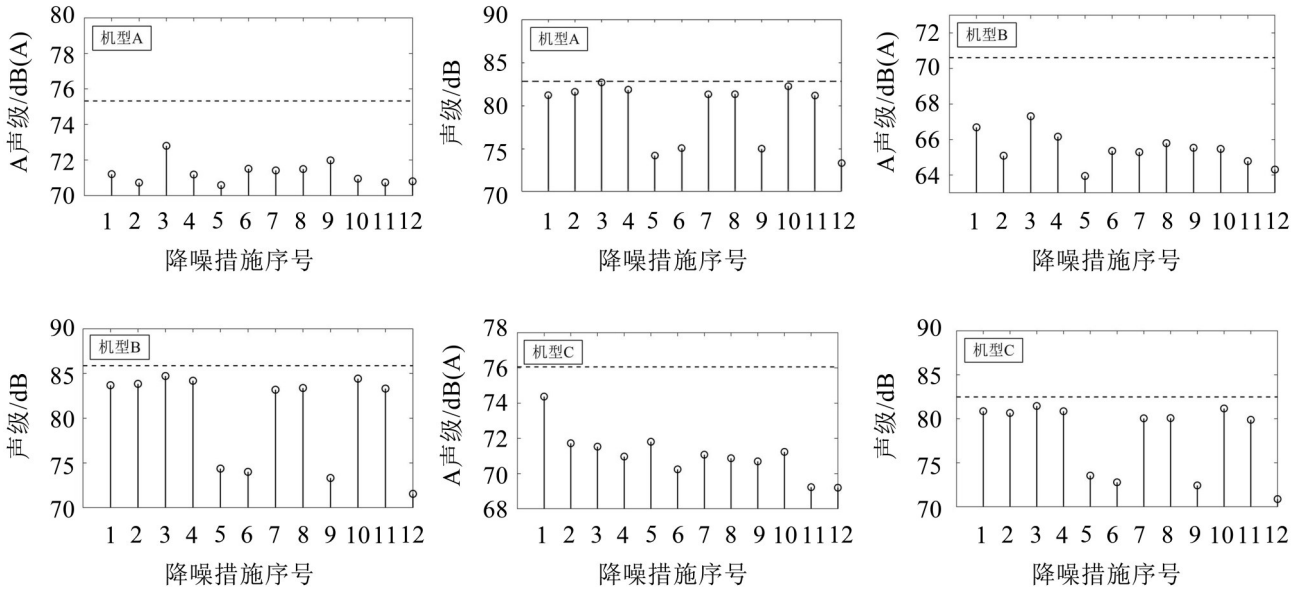


图 5 降噪前后线性计权声级和A计权声级对比

表 4 机型A降噪前后心理声学参数及烦恼度差值

措施序号	响度/sone	尖锐度/acum	粗糙度/asper	波动强度/vacil	烦恼度预测值
1	−11.420	−0.029	0.113	0.001	−2.326
2	−12.470	−0.006	0.179	0.002	−2.517
3	−9.360	−0.025	0.163	0.002	−1.863
4	−10.820	−0.033	0.138	0.002	−2.194
5	−12.580	0.150	0.161	0.002	−2.529
6	−11.830	0.070	0.124	0.001	−2.406
7	−12.110	−0.001	0.160	0.002	−2.454
8	−11.230	0.090	0.127	0.001	−2.272
9	−11.690	0.083	0.176	0.002	−2.334
10	−11.730	0.000	0.165	0.002	−2.360
11	−12.240	0.047	0.139	0.001	−2.472
12	−13.230	0.110	0.158	0.001	−2.661
原样本	38.730	1.447	0.645	0.012	5.976

表 5 机型B降噪前后心理声学参数及烦恼度差值

措施序号	响度/sone	尖锐度/acum	粗糙度/asper	波动强度/vacil	烦恼度预测值
1	−6.890	−0.031	0.037	0.003	−1.488
2	−8.830	−0.061	0.015	0.001	−1.885
3	−6.470	−0.036	0.006	0.001	−1.405
4	−7.260	−0.076	−0.010	0.001	−1.570
5	−11.890	0.342	−0.019	0.000	−2.462
6	−10.090	0.155	0.091	0.001	−2.068
7	−9.200	−0.016	−0.001	0.001	−1.972
8	−8.340	0.026	0.031	0.001	−1.772
9	−10.680	0.211	0.037	0.001	−2.244
10	−8.210	−0.045	0.003	0.001	−1.761
11	−9.400	0.059	0.009	0.001	−2.012
12	−11.970	0.258	0.093	0.001	−2.533
原样本	30.040	1.443	0.627	0.008	4.227

表 6 机型C降噪前后心理声学参数及烦恼度差值

措施序号	响度/sone	尖锐度/acum	粗糙度/asper	波动强度/vacil	烦恼度预测值
1	−9.690	−0.059	0.035	−0.001	−2.000
2	−11.410	−0.053	0.186	0.002	−2.281
3	−10.800	−0.048	−0.001	−0.003	−2.221
4	−10.910	−0.070	0.072	−0.001	−2.224
5	−13.560	0.245	0.123	0.003	−2.800
6	−14.170	0.098	0.040	−0.002	−2.911
7	−12.590	−0.010	0.080	0.000	−2.595
8	−11.870	−0.003	0.132	−0.001	−2.362
9	−14.550	0.151	0.018	−0.002	−3.017
10	−11.410	−0.048	0.138	0.001	−2.295
11	−14.170	0.029	−0.003	−0.003	−2.939
12	−16.400	0.176	0.038	−0.002	−3.368
原样本	37.880	1.457	1.060	0.023	5.965

的波动强度，原因可能在于机型C线谱比机型A、B多，而大部分降噪措施可以吸收线谱。但烦恼度的改善效果仍是由响度决定的，其中12号措施的烦恼度改善效果最好，1号措施的烦恼度改善效果最差。

3.3 典型降噪措施的声品质改善效果分析

结合上面的结论，可以看出，12种典型降噪措施均对声品质有较好的改善效果。其中：

（1）铺设穿孔板（穿孔率13 %，空腔厚0.5 m，前部填充0.1 m岩棉）对三种机型的声品质改善效果均为最佳。毛毡乳胶粘合泡沫橡胶和5 mm厚针刺毡对三种机型的声品质改善效果最差。

（2）铺设帆布罩、5 cm厚皮革覆盖软棉垫、5 cm厚岩棉（未处理表面）、穿孔板（穿孔率13 %，空腔厚5 cm，填充5 cm岩棉）对三种机型的声品质改善均有较好的效果，说明这四种措施具有良好的通用性。

（3）铺设9 mm厚簇绒毛毡、2.5 cm厚吸声棉、玻璃纤维毛毯（2.54 cm厚玻璃棉夹层）对三种机型的声品质改善效果均较差。综合（1）和（2），可以得出结论：在中低频段吸声性能优秀的措施对声品质的改善效果更好。

（4）铺设1.9 cm厚矿物纤维涂层，对机型A的声品质改善效果较好，对机型C的效果较差。其主要原因在于该措施对机型A的粗糙度提高了27.8 %，但同时较大幅度地提升了其波动强度（20.6 %），弥补了粗糙度提升造成的烦恼度变化，因此总体效果较好。对机型C的粗糙度提高了17.5 %，且机型C的粗糙度本就远大于机型A、B，因此增加机型C烦恼度的效果更为明显。

（5）5.5 cm厚微孔砖（23 %穿孔率，空腔内填充5 cm厚岩棉），对机型B、C的效果较好，对机型A的效果较差。其主要原因在于该措施大幅度提高了机型A的粗糙度（27.3 %），而对机型B、C的粗糙度影响很小，且它对三种机型响度的降低程度大致相同，因此该措施对机型A的效果较差。结合（4）可得出结论：不同措施的声品质改善效果还取决于不同型号直升机的舱内噪声特性，需结合实际分析。

（6）从吸声措施类型来看，吸声结构效果最好，吸声材料次之，阻尼材料效果最差。

4　结　语

本文建立了直升机舱内噪声烦恼度的多元线性回归模型，分析了12种典型降噪措施的声品质改善效果。研究发现穿孔板（穿孔率13 %，空腔厚0.5 m，前部填充0.1 m岩棉）的声品质改善效果最好，毛毡乳胶粘合泡沫橡胶和5 mm厚针刺毡效果最差。从吸声措施类型来看，吸声结构最好，吸声材料次之，阻尼材料最差。

参考文献：

[1] 熊巍，徐先荣，刘玉华，等. 改装体检直升机与歼击机飞行员听力分析[J]. 听力学及言语疾病杂志，2011，19(6)：534-536.

[2] 陈克安. 环境声的听觉感知与自动识别[M]. 北京：科学出版社，2014.

[3] SOETA Y, SHIMOKURA R. Sound quality evaluation of air-conditioner noise based on factors of the autocorrelation function[J]. Applied Acoustics, 2017, 124: 11-19.

[4] TAGHIPOUR A, PIEREN R, SCHAFFER B, et al. Short-term annoyance reactions to civil helicopter and propeller-driven aircraft noise: A laboratory experiment[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(2): 956-967.

[5] LI D, HUANG Y. The discomfort model of the micro commercial vehicles interior noise based on the sound quality analyses[J]. Applied Acoustics, 2018: 223-231.

[6] HUANG Y, JIANG W. The effect of exposure duration on the subjective discomfort of aircraft cabin noise[J]. Ergonomics, 2017, 60(1): 18-25.

[7] EKMAN M R, LUNDEN P, NILSSON M E, et al. Similarity and pleasantness assessments of water-fountain sounds recorded in urban public spaces[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(5): 3043-3052.

[8] YANG W, MOON H J. Effects of recorded water sounds on intrusive traffic noise perception under three indoor temperatures[J]. Applied Acoustics, 2019: 234-244.

[9] GUSKI R, SCHRECKENBERG D, SCHUEMER R. WHO environmental noise guidelines for the european region: A systematic review on environmental noise and annoyance[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(12): 1539.

[10] GUSKI R, FELSCHER-SUHR U, SCHUEMER R. The concept of noise annoyance: How international experts see it?[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 223(4): 513-527.

[11] 周静. 飞机客舱噪声声品质的评价与建模[D]. 西安：西北工业大学，2016.

[12] KROKSTAD A, STROM S, SØRSDAL S. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique[J]. Journal of Sound and Vibration, 1968, 8(1): 118-125.

[13] KROKSTAD A, STRØM S, SØRSDAL S. Fifteen years experience with a computerized ray tracing program[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 71 (S1): S4-S4.

[14] VORLÄNDER, MICHAEL. Computational methods in architectural acoustics[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(4): 2364-2364.

[15] 郭天葵. 中国民族音乐厅堂ITDG和IACC的主观优选研究[D]. 广州：华南理工大学，2013