

# 基于声学处理的风扇噪声预测模型改进

闫国华<sup>1,2</sup>, 李成晨<sup>1</sup>, 王玺臻<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1</sup>

(中国民航大学航空工程学院<sup>1</sup>, 基础实验中心<sup>2</sup>; 天津 300300)

**摘要:** Heidmann 风扇噪声模型没有考虑风扇外涵道中的声学处理对于噪声抑制的影响, 导致风扇噪声的预测结果普遍大于试验结果。为了提高预测结果精度, 利用风扇噪声抑制模型分别求出风扇进口衰减系数和出口衰减系数, 然后将其应用于 Heidmann 模型中, 计算修正后的风扇进口噪声和出口噪声的均方声压。将 MATLAB 软件作为风扇噪声预测模型的开发平台, 以某型涡扇发动机为例进行预测。结果表明: 相较于原模型的预测结果, 改进模型的风扇噪声明显降低, 最大降幅达到 7 dB; 通过对比风扇噪声在各工况下的预测结果和试验结果发现, 改进模型预测值与实测值的平均误差从原模型的 5 dB 降低到 3 dB 以下。该改进方法有效改善了 Heidmann 模型预测结果偏大的情况, 使风扇噪声的预测结果更加准确。

**关键词:** Heidmann 模型; 声学处理; 风扇噪声; 衰减系数; 均方声压; 涡扇发动机

中图分类号: V235.13

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.004

## Improvement of Fan Noise Prediction Model Based on Acoustic Treatment

YAN Guo-hua<sup>1,2</sup>, LI Cheng-chen<sup>1</sup>, WANG Xi-zhen<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>

(College of Aeronautical Engineering<sup>1</sup>, Basic Experiment Center<sup>2</sup>, Civil Aviation University of China; Tianjin 300300, China)

**Abstract:** It was not considered Heidmann fan noise model in as the influence of the acoustic treatment in the fan duct on the noise suppression, which led to the prediction results of fan noise generally larger than the experimental results. In order to improve the accuracy of the prediction results, the fan noise suppression model was used to calculate the fan inlet attenuation coefficient and the fan outlet attenuation coefficient respectively, and it was applied to the heidmann model to calculate the modified mean square acoustic pressure of the fan inlet noise and the fan outlet noise. Matlab software was used as the development platform of fan noise prediction model, and a turbofan engine was taken as an example to predict. The results show that: comparing with the prediction results of the original model, the fan noise of the improved model is significantly reduced, and the maximum reduction is 7 dB. By comparing the predicted and experimental results of fan noise under various working conditions, it is found that the average error between the predicted and measured values of the improved model is reduced from 5 dB of the original model to less than 3 dB. The improved method can effectively improve the situation that the prediction result of heidmann model is too large, and make the prediction result of fan noise more accurate.

**Key words:** Heidmann model; acoustic treatment; fan noise; attenuation coefficient; mean-square acoustic pressure; turbofan engine

## 0 引言

在飞机早期设计阶段, 为了对各设计方案的噪声水平进行有效评估, 需要通过更为便捷的方式来快速地获得噪声数据, 而预测方法以其独有的先进性成为最理想的解决方案<sup>[1]</sup>。如今, 随着大涵道比涡扇发动机逐渐成为商用飞机的主流, 使得风扇噪声对于飞机总噪声的影响愈发显著, 因此开展风扇噪声预测研究尤为重要<sup>[2-4]</sup>。Heidmann 模型是目前使用最为广泛也

是最具代表性的风扇噪声预测模型<sup>[5]</sup>, 该模型经过了多次更新和修正。在国外, 美国联信 (Allied Signal) 公司修正了 Heidmann 模型对进口和出口单音噪声水平、进口组合单音噪声水平和频谱形状的过度预测, 并较小程度修正了对进口和出口宽频噪声水平和频谱形状的过度预测, 使其适用于小型支线运输机和商用飞机的风扇噪声预测, 该方法收录在飞机噪声预测程序 (Aircraft Noise Prediction Program, ANOPP) 中<sup>[6]</sup>;

收稿日期: 2020-12-18 基金项目: 天津市教委科研计划 (2020KJ017)、中国民航大学科研启动基金 (2020KYQD76) 资助

第一作者: 闫国华 (1964), 男, 教授, 研究方向为航空发动机噪声适航审定; E-mail: ghyan@cauc.edu.com。

通信作者: 刘勇 (1989), 男, 博士, 研究方向为航空发动机结构强度振动与密封; E-mail: liuyongyb@126.com。

引用格式: 闫国华, 李成晨, 王玺臻, 等. 基于声学处理的风扇噪声预测模型改进[J]. 航空发动机, 2021, 47(增刊1): 19-24. YAN Guohua, LI Chengchen, WANG Xizhen, et al. Improvement of fan noise prediction model based on acoustic treatment[J]. Aeroengine, 2021, 47(S1): 19-24.

GE公司对Heidmann模型进行了更新,以提高对大型风扇噪声的预测,相关研究成果也用于ANOPP的改进<sup>[7]</sup>。在中国,王良锋等<sup>[8]</sup>通过引入风扇叶尖弦长雷诺数和几何参数,改善了Heidmann模型对风扇进口低频噪声预测结果偏低的情况。虽然Heidman模型经过一系列修正完善后,其预测范围和可靠性都得到了较大提升,但依然没有考虑风扇外涵道中的声学处理对于噪声抑制的影响,也即缺少对于风扇降噪设计的研究。因此,开展基于声学处理的风扇噪声预测模型研究,不仅能够提高风扇噪声的预测精度,也对未来低噪声风扇的设计具有十分重要的意义。

目前,涡扇发动机常采用的声学处理技术包括斜切进气道、安装声学衬套、定子叶片扫掠和倾斜以及主动-被动控制等,其中在风扇外涵道内铺设声衬是抑制风扇噪声最有效的方式<sup>[9]</sup>。为了评估声衬技术对风扇噪声的影响,采用由GE公司建立的风扇噪声抑制模型对声衬引起的噪声衰减进行预测,其结果也被用来对声衬的设计优化提供数据支撑<sup>[10]</sup>。

本文采用风扇噪声抑制模型分别求出风扇进口衰减系数和出口衰减系数,将其应用于Heidmann模型中从而对风扇噪声的均方声压进行改进,通过计算得到改进后的风扇噪声,并根据试验测量结果验证该算法的可靠性。

## 1 风扇噪声预测模型的改进方法

### 1.1 Heidmann风扇噪声预测模型

Heidmann模型预测了单级或双级涡扇发动机中(带或不带进口导向叶片)风扇部件的噪声级,包括进口宽频噪声、进口离散单音噪声、进口组合单音噪声、出口宽频噪声以及出口离散单音噪声5个分量<sup>[11]</sup>。利用更新后的Heidmann大风扇噪声预测模型对某型涡扇发动机风扇部件的静态噪声进行预测,其中在标准海平面条件下的声压级通式为

$$S_i(f, \theta) = 20 \lg \frac{\Delta T^*}{\Delta T_{\text{ref}}^*} + 10 \lg \frac{m^*}{m_{\text{ref}}^*} + F_1(Ma_d, Ma_r) + F_2(s^*) + C + D(\theta) + S(\eta) \quad (1)$$

式中: $f$ 为24个1/3倍频程的中心频率; $\theta$ 为极指向角;上标\*表示所对应的参数为无量纲量,根据参数归一化计算公式可得 $\Delta T^* = \Delta T/T_\infty$ , $\Delta T$ 为风扇的总温升, $T_\infty$ 为环境温度; $\Delta T_{\text{ref}}^* = \Delta T_{\text{ref}}/T_\infty$ , $\Delta T_{\text{ref}}$ 为参考温升,通常取值为0.555 K; $m^* = m/(\rho_\infty c_\infty A_e)$ , $m$ 为质量流量, $\rho_\infty$

为环境密度, $c_\infty$ 为环境声速, $A_e$ 为发动机参考面积; $m_{\text{ref}}^* = m_{\text{ref}}/(\rho_\infty c_\infty A_e)$ , $m_{\text{ref}}$ 为参考质量流量,通常取值为0.453 kg/s; $F_1$ 和 $F_2$ 为声源强度函数; $Ma_d$ 为风扇设计相对马赫数; $Ma_r$ 为风扇相对叶尖马赫数; $s^*$ 为风扇转静间距比; $C$ 为进口导向叶片修正系数; $D$ 为指向性函数; $S$ 为频谱函数; $\eta$ 为频率参数。

### 1.2 风扇噪声抑制模型

美国NASA对GE公司开发的风扇噪声抑制模型进行了完善与总结,并将其收录在ANOPP中<sup>[12]</sup>。该模型适用于常规(穿孔)声衬,分为进口和出口2种情况进行考虑,通常对于进口圆形管道的处理被假定为单壁,而出口环形管道的处理则可以是单壁或者双壁。声学处理利用风扇管道的尺寸参数进行几何描述,并最终生成关于进口和出口的噪声衰减。

当频率大于160 Hz以及极指向角 $\theta = 10^\circ \sim 90^\circ$ 时,进口声学处理的表达式为

$$\Delta S_{\text{in}} = \frac{f \cdot L_{\text{in}}}{c_\infty} \left\{ \sum_{i=1}^5 \left[ \left( \sum_{j=1}^7 A_{ij} \cdot \theta^{j-1} \right) \cdot \left[ \lg \frac{2 \cdot f \cdot H_{\text{in}}}{c_\infty} \right] \right]^{i-1} \right\} \quad (2)$$

式中: $A_{ij}$ 为进口处理系数,见表1; $L_{\text{in}}$ 为进口处理区域的轴向长度; $H_{\text{in}}$ 为进口处理区域的平均半径。

表1 风扇进口处理系数

$j/i$	1	2	3	4	5
1	13.4	-53.5	65.7	-23.0	$-9.5 \times 10^{-2}$
2	-3.2	13.3	-17.4	6.9	-0.1
3	0.3	-1.1	1.4	-0.6	0.02
4	$-9.4 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-2}$	$-5.4 \times 10^{-2}$	0.02	$-9.5 \times 10^{-4}$
5	$1.7 \times 10^{-4}$	$-7.2 \times 10^{-4}$	$9.8 \times 10^{-4}$	$-4.3 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-5}$
6	$-1.5 \times 10^{-6}$	$6.3 \times 10^{-6}$	$-8.6 \times 10^{-6}$	$3.8 \times 10^{-6}$	$-1.7 \times 10^{-7}$
7	$4.9 \times 10^{-9}$	$-2.1 \times 10^{-8}$	$2.9 \times 10^{-8}$	$-1.3 \times 10^{-8}$	$5.7 \times 10^{-10}$

进口衰减系数为

$$T_{\text{in}} = 10^{-0.10 \cdot \Delta SPL_{\text{in}}} \quad (3)$$

当频率大于400 Hz以及 $\theta = 90^\circ \sim 160^\circ$ 时,出口声学处理的表达式为

$$\Delta S_{\text{out}} = \frac{f \cdot L_{\text{out}}}{c_\infty} \left\{ \sum_{i=1}^5 \left[ \left( \sum_{j=1}^7 B_{ij} \cdot \theta^{j-1} \right) \cdot \left[ \lg \frac{f \cdot H_{\text{out}}}{c_\infty} \right] \right]^{i-1} \right\} \quad (4)$$

式中: $B_{ij}$ 为出口处理系数,见表2; $L_{out}$ 为出口处理区域的轴向长度; $H_{out}$ 为出口处理区域的平均高度。

表2 风扇出口处理系数

$j/i$	1	2	3	4	5
1	-116.8	7684.9	4392.0	-73.7	-4.2
2	4.4	-384.3	-216.2	2.6	0.1
3	-0.06	7.9	4.4	-0.03	$-1.3 \times 10^{-3}$
4	$4.3 \times 10^{-4}$	$-8.7 \times 10^{-2}$	$-4.7 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-6}$
5	$-1.3 \times 10^{-6}$	$5.3 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-4}$	$-4.1 \times 10^{-7}$	0
6	$1.5 \times 10^{-9}$	$-1.7 \times 10^{-6}$	$-9 \times 10^{-7}$	0	0
7	0	$2.3 \times 10^{-9}$	$1.2 \times 10^{-9}$	0	0

出口衰减系数为

$$T_{out} = 10^{-0.10 \cdot \Delta S_{out}} \quad (5)$$

### 1.3 均方声压的改进

利用Heidmann模型的预测算法先求出改进前的均方声压,然后分别带入进、出口衰减系数,最后通过整合计算得到改进后的总均方声压,其无量纲的表达式为

$$\langle p^2(f, \theta, \phi) \rangle^* = T_{in} \cdot \langle p^2(f, \theta, \phi) \rangle_{in}^* + T_{out} \cdot \langle p^2(f, \theta, \phi) \rangle_{out}^* \quad (6)$$

式中: $\langle p^2(f, \theta, \phi) \rangle_{in}^*$ 、 $\langle p^2(f, \theta, \phi) \rangle_{out}^*$ 分别为进、出口无量纲均方声压。

风扇总噪声的声压级为

$$S = 10 \lg \langle p^2(f, \theta, \phi) \rangle^* + 20 \lg \frac{\rho_{\infty} c_{\infty}^2}{P_{ref}} \quad (7)$$

式中: $P_{ref}$ 为参考压强,通常取值为 $2 \times 10^{-5}$  Pa。

### 1.4 预测算法的实现

MATLAB软件<sup>[13]</sup>具有强大的数值计算以及数据可视化能力,将其作为风扇噪声预测模型的开发平台,通过设定参数,分模块编程,并进行整合计算后实现噪声的预测功能,如图1所示。

### 1.5 可靠性分析

为了验证Heidmann模型的可靠性,NASA利用大量的试验数据对其进行评估,结果表明预测方法能够较好地模拟出发动机在实际情况下产生的噪声,该方法也已被各大发动机厂商及研究机构所采纳<sup>[14]</sup>。某次试验中发动机风扇进口噪声在各频率下预测结果与试验测量结果的误差值如图2所示。从图中可见,绝大多数误差值小于5 dB,在噪声预测标准可接受误差范围之内。因此,利用Heidmann模型预测风扇噪

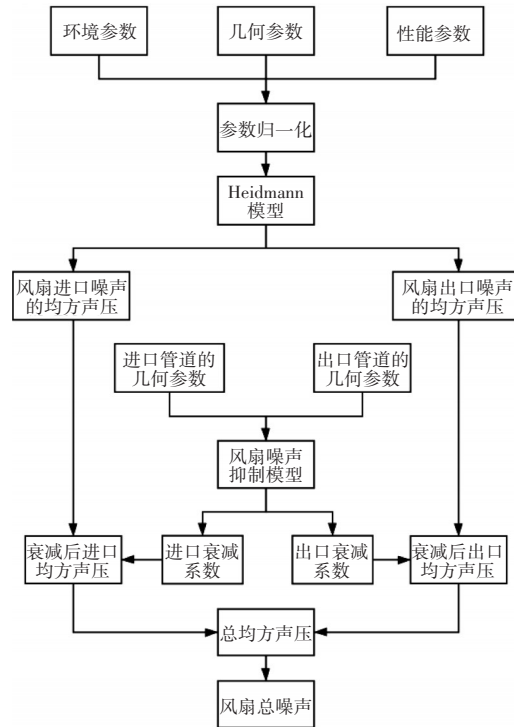


图1 改进模型的计算流程

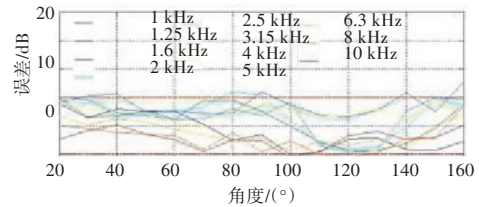


图2 预测结果与试验测量结果的误差值

声在方法上是可行的。

## 2 风扇噪声的计算分析

以某型涡扇发动机为例,对Heidmann模型和改进模型的预测结果进行对比分析。

### 2.1 参数输入

发动机在地面静态测试中的基准试验条件:大气压为101325 Pa,相对湿度为70%,环境温度为25℃,零风速等<sup>[15]</sup>。风扇的几何参数见表3。

表3 风扇的几何参数

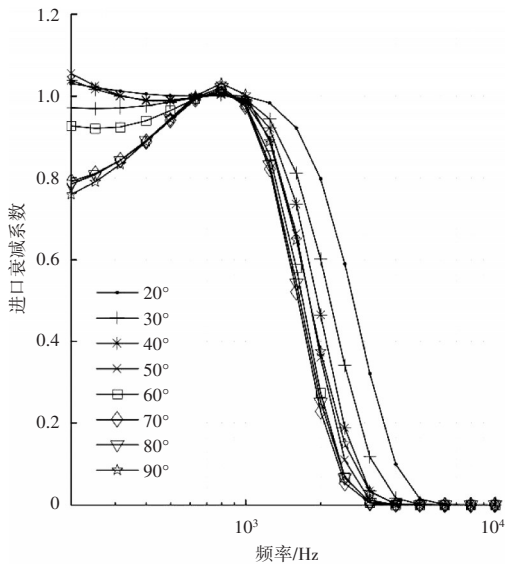
参数	数值	参数	数值
转子直径/m	1.55	转子叶片数	24
轮毂直径/m	0.63	静子叶片数	76
风扇参考面积/m <sup>2</sup>	1.89	转静子间距比	1.7
进口环流面积/m <sup>2</sup>	1.58		

### 2.2 预测结果分析

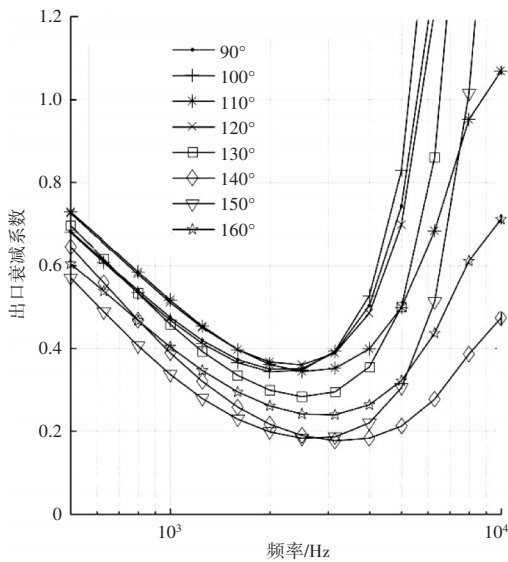
#### 2.2.1 衰减系数

风扇噪声的衰减系数与外涵道的几何尺寸和环

境声速有关,该系数的有效范围为0.1~1,当其偏小或偏大时,都会降低噪声衰减预测的可靠性。此外,当衰减系数出现负向抑制的现象时,也即衰减系数曲线的斜率为正时,此时的噪声衰减预测不再可靠。该型发动机风扇进口衰减系数和出口衰减系数的变化曲线如图3所示,其中横坐标是用对数表示的中心频率。



(a) 进口衰减系数



(b) 出口衰减系数

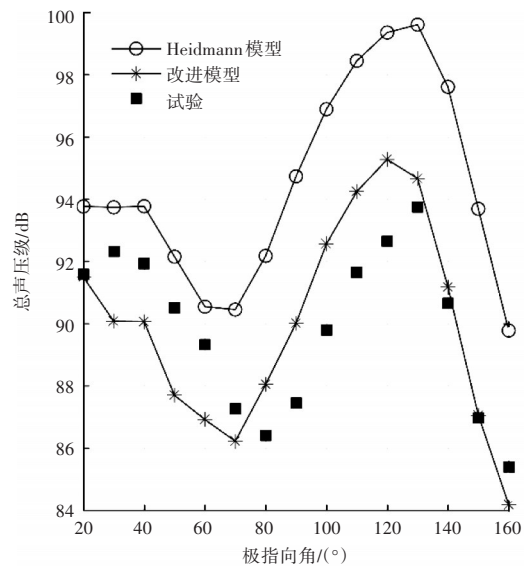
图3 风扇噪声的衰减系数

从图3(a)中可见,当频率小于1000 Hz时,进口衰减系数主要分布在0.7~1.1之间,对于低频噪声的抑制作用较弱;而当频率大于1000 Hz后,进口衰减系数迅速减小,对于高频噪声的抑制作用明显增强;但当进口衰减系数降至0.1以下时,由于系数过于偏小,因此对于噪声衰减的预测变得不再可靠。从图3

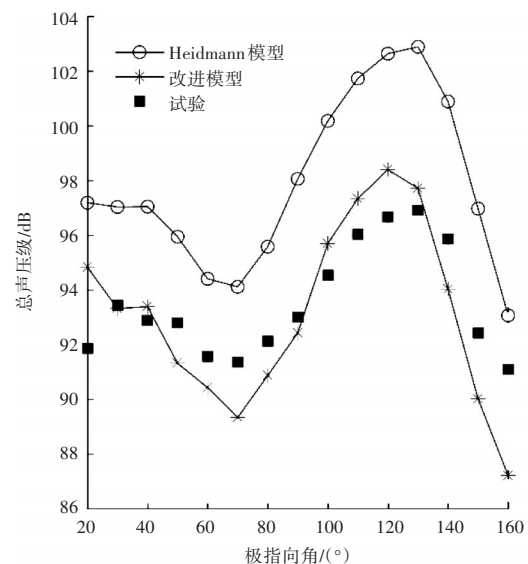
(b)中可见,在低频范围内出口衰减系数随着频率的提高而减小,但在高频范围内,出口衰减系数逐渐停止减小的趋势并随着频率的提高而增大,出现负向抑制的现象,使得此时的噪声衰减预测不再可靠。因此,在实际预测过程中需要用有效数值替换这些不可靠值。

### 2.2.2 风扇噪声预测对比分析

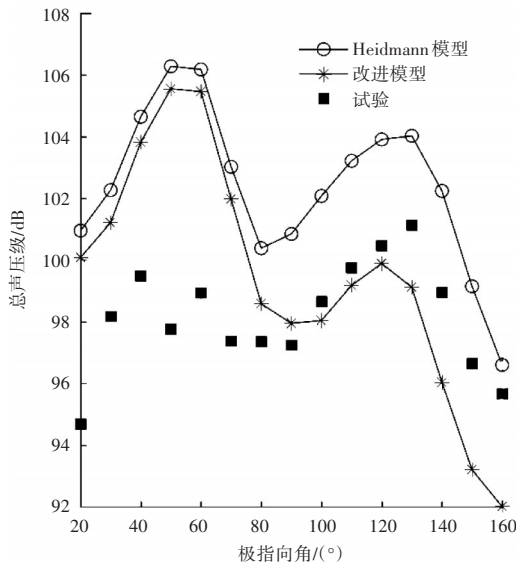
在发动机部件静态噪声测试中,风扇的进近转速为3100 r/min,飞越转速为4100 r/min,边线转速为4700 r/min,最大额定工况下的转速为5300 r/min,利用改进模型分别预测风扇在各条件下的噪声级,并与Heidmann模型的预测结果和试验结果进行对比分析,如图4所示。



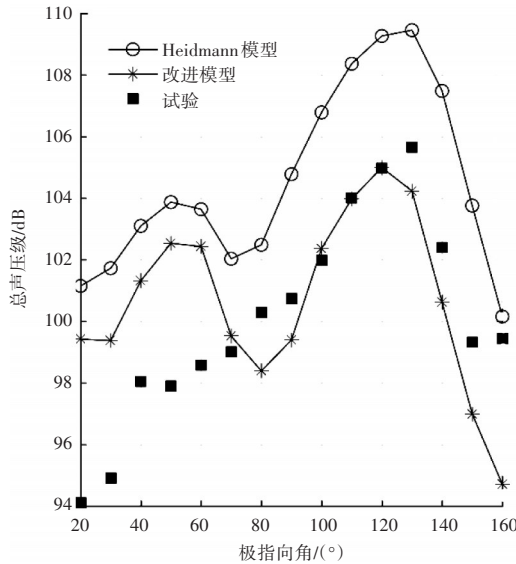
(a) 3100 r/min



(b) 4100 r/min



(c) 4700 r/min



(d) 5300 r/min

图4 风扇噪声的指向性曲线

从图4中可见,预测模型的指向性趋势与试验结果较为一致,在经过声学处理前,Heidmann模型的预测值普遍高于试验测量值;而在经过声学处理后,改进模型在各条件下的总声压级都显著降低,在进近、飞越、边线和最大额定条件下最大降幅分别为6.63、7.00、6.21和6.87 dB。通过与试验结果进行对比发现,改进后的预测值明显要与试验值更为相符。Heidmann模型和改进模型在各转速下预测值与实测值的平均误差见表4。

从表中可见,Heidmann模型在各转速下预测值与实测值的平均误差均小于5 dB,在噪声预测标准的可接受误差范围之内。而当Heidmann模型在考虑声学处理的影响后,其改进模型的预测结果得到了明显

表4 预测值与实测值的平均误差

转速/(r/min)	Heidmann模型/dB	改进模型/dB
3100	4.80	1.85
4100	4.45	1.26
4700	4.33	2.95
5300	4.53	2.00

改善,与实测值的平均误差在3 dB以内,具有更高的预测精度。

### 3 结论

本文通过分析声学处理对于风扇噪声的影响,而对Heidmann风扇噪声预测模型进行了改进,得到以下结论:

(1)相较于Heidmann模型的预测结果,改进模型的风扇噪声显著降低,尤其是在飞越条件下,当极指向角为150°时,最大降幅达到7 dB,改进效果明显。

(2)通过对比分析风扇噪声在各工况下的预测结果和试验结果可知,改进模型的预测值与实测值的平均误差从原模型的5 dB减小到3 dB以内,从而有效改善了Heidmann模型中预测结果普遍偏大的情况,使得风扇噪声的预测结果更加准确可靠。

该改进方法不仅可以应用于飞机噪声适航审定领域,还能为未来低噪声发动机设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 柴啸. 客机总体参数与发动机参数综合优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [2] CHAI Xiao. A study on integrated optimization of airframe and engine parameters in conceptual design of airliners[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [3] 唐狄毅, 李文兰, 乔渭阳. 飞机噪声基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [4] TANG Diyi, LI Wenlan, QIAO Weiyang. Fundamentals of aircraft noise[M]. Xi'an, Northwestern Polytechnical Press, 1995. (in Chinese)
- [5] 乔渭阳. 航空发动机气动声学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [6] QIAO Weiyang. Aeroengine acoustic[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 张强. 气动声学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [8] ZHANG Qiang. Fundamentals of Aeroacoustics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [9] Heidmann M F. Interim prediction method for fan compressor source noise[R]. NASA-TM-1979-71763.
- [10] Hough J W, Weir D S. Aircraft noise prediction program (ANOPP)

- fan noise prediction for Small engines[R]. NASA-CR-1996-198300.
- [7] Kontos K, Janardan B, Glibe P. Improved NASA-ANOPP prediction computer code for advanced subsonic propulsion systems[R]. NASA-CR-1996-195480.
- [8] 王良锋, 乔渭阳, 纪良, 等. 风扇进口噪声预测模型的改进[J]. 推进技术, 2015, 36(2): 226-231.  
WANG Liangfeng, QIAO Weiyang, JI Liang, et al. An improved prediction model for fan inlet noise[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(2): 226-231. (in Chinese)
- [9] 张英杰. 声衬技术在大涵道比发动机短舱上的应用[J]. 中国设备工程, 2017(22): 119-120.  
ZHANG Yingjie. Application of acoustic lining technology in high by-pass ratio engine nacelle[J]. China Plant Engineering, 2017 (22) : 119-120. (in Chinese)
- [10] Kontos K B, Kraft R E, Glibe P R. Improved NASA-ANOPP noise prediction computer code for advanced subsonic propulsion systems. volume 2: fan suppression model development[R]. NASA-CR-1996-202309.
- [11] 闫国华, 田硕. 飞行状态下涡扇发动机风扇音频信号合成[J]. 声学技术, 2020, 39(1): 87-92.  
YAN Guohua, TIAN Shuo. Synthesis of fan audio signals of turbofan engine in flight state[J]. Technical Acoustics, 2020, 39(1) : 87-92. (in Chinese)
- [12] Zorunski W E. Aircraft noise prediction program theoretical manual, Part 1&2[R]. NASA-TM-1982-83199.
- [13] 陈凌云, 肖应雄. 基于 MATLAB 的概率分布函数可视化研究[J]. 湖北工程学院学报, 2018, 38(3): 113-117.  
CHEN Lingyun, XIAO Yingxiong. Research on visualization of probability distribution function based on MATLAB software[J]. Journal of Hubei Engineering University, 2018, 38 (3) : 113-117. (in Chinese)
- [14] 闫国华, 陈柏瑞. 涡扇发动机风扇静态噪声预测[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(2): 91-94.  
YAN Guohua, CHEN Borui. Static noise prediction for the turbofan engine fans[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(2) : 91-94. (in Chinese)
- [15] 戴康宁. 基于发动机风扇静态噪声预测飞行噪声的方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.  
DAI Kangning. Research on the method of predicting flight noise based on engine static noise[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018. (in Chinese)

(编辑:程海)