

文章编号:1006-1355(2017)02-0091-04

涡扇发动机风扇静态噪声预测

闫国华, 陈柏瑞

(中国民航大学, 天津 300300)

摘要: 发动机风扇是涡扇发动机最主要的噪声源之一,其产生的机理是气体在高速旋转的叶片之间流动,引起强烈的宽频噪声和单音噪声。利用 Matlab 软件编程实现 Heidmann 大风扇修正噪声模型,对某型大涵道比涡扇发动机风扇静态噪声进行预测。建立该发动机风扇噪声数据库,通过基于 1/3 倍频程频谱的声压级和感觉噪声级来分析噪声预测结果。

关键词: 声学;发动机风扇噪声;Heidmann 模型;噪声预测

中图分类号: V216.5⁺4

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2017.02.019

Static Noise Prediction for the Turbofan Engine Fans

YAN Guo-hua, CHEN Bo-rui

(Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Engine fan is one of the main noise sources of the turbofan engine. Its noise is generally caused by the airflow through high speed rotating blades, which leads to strong broadband noise and tone noise. This paper focuses on the static noise prediction of turbofan engine fans. An improved Heidmann large fan noise model is established by means of Matlab code, and used to predict fan's static noise of a high bypass turbofan engine. The noise database of the engine fan is built. The noise prediction results are analyzed according to the sound pressure level (SPL) and perceived noise level (PNL) based on 1/3 octave band.

Key words: acoustics; engine fan noise; Heidmann model; noise prediction

随着航空业的飞速发展,喷气式飞机被广泛应用于民航领域,在方便人们出行的同时也引起了严重的噪声污染。于是,航空噪声开始受到人们的关注。航空噪声问题主要由飞机机体噪声和发动机噪声引起^[1]。为了降低发动机噪声,达到适航审定的标准,发动机制造商和研发部门投入了大量人力物力来研究行之有效的降噪策略,也进行了大量的静态噪声实验。相比于传统的试验测试手段,发动机噪声预测的方法既能节约试验成本又能降低研发风险,且预测结果能够较好地符合发动机噪声的实际情况。

1 风扇噪声预测方法

1.1 Heidmann 风扇噪声预测模型

Heidmann 方法建立在实验数据的基础上,从早

期波音公司对风扇噪声的预测方法演变而来。而后为了预测方法的广泛应用,又进行了两次修订。一次是针对短途运输机和公务机的小风扇预测模型(发动机地面试车推力小于 26.7 kN);另一次是针对大涵道比(涵道比大于等于 8)发动机的大风扇修订预测模型^[2-3]。

文中基于改进的 Heidmann 大风扇噪声预测模型,用该预测方法对某型大涵道比涡扇发动机风扇噪声进行静态预测,分别在 1/3 倍频程上计算风扇噪声的五个分量,即风扇进口宽频噪声、风扇进口离散单音噪声、风扇进口组合单音噪声、风扇出口宽频噪声和风扇出口离散单音噪声。最后进行整合运算,并绘制图像进行分析。

1.2 噪声的度量标准

有声波存在时,局部空气产生压缩或膨胀,这样在原来的大气压上又叠加一个压强的变量,称为声压。声压的大小与物体的振动有关,物体振动的幅度越大,而声压也越大,因此,声压表示了声波的强弱。声压级 SPL 是基于对数尺度,参照一个代表听阈的基准压强,对声音进行具体度量的尺度,单位是

收稿日期:2016-10-17

作者简介:陈柏瑞(1990—),男,陕西省西安市人,研究生,主要研究方向为航空发动机噪声。

通信作者:闫国华,男,研究生导师。

E-mail: ghyan@cauc.edu.cn

分贝(dB)。

而噪度是人耳对噪声烦扰程度的主观感受,单位是纳(noy)。定义1 000 Hz频率上的40 dB噪声所产生的烦扰度为1 Noy。噪度可以根据给定的频率和声压级计算,累计各频率下的噪度进行加权叠加,得到感觉噪声级PNL。感觉噪声级是噪声烦扰程度的直观数值表达^[4]。

对噪声信号的处理常用倍频程或1/3倍频程带宽来表示,倍频程是指每段带宽上的上限频率和下限频率相差1倍的频带宽,而1/3倍频程则是在此基础上再将带宽平分成3段,这时,每段上限频率为下限频率的 $\sqrt[3]{2}$ 倍。

2 预测算法的实现及其可靠性

2.1 预测算法的实现

运用Matlab强大的数据处理功能,可以进行矩阵运算、绘制函数图像和分析数据。按照Heidmann大风扇修正预测模型分模块编写代码,设定参数,最后进行整合运算,实现对涡扇发动机风扇噪声的预测功能,运算流程见图1。

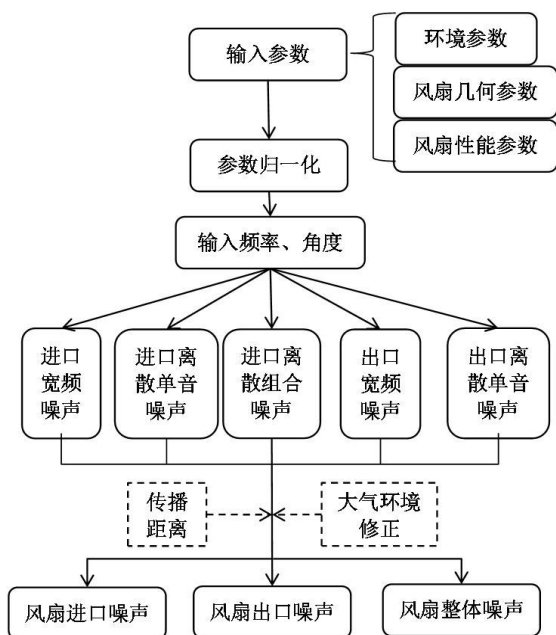


图1 噪声预测流程图

进行风扇噪声运算前,需要设定的参数可以划分为环境参数、风扇几何参数、风扇性能参数。首先将输入参数进行无量纲化,带入到预测模型的公式中,分别得到风扇噪声的五个不同模块在不同角度(0°~180°)、不同频率(50 Hz~10 000 Hz, 1/3倍频程)工况下的均方声压值,考虑其传播距离并进行环境修正,整合后得到风扇进口噪声、风扇出口噪声和风扇整体噪声的声压级。再对不同频段的声压级进行叠加,可以计算风扇噪声的感觉噪声级。

2.2 可靠性分析

NASA使用大量涡扇发动机静态噪声实验数据对Heidmann方法进行评估,预测结果贴近于发动机实际产生的噪声。该方法作为航空器噪声预测计划(Aircraft Noise Prediction Program, ANOPP)风扇噪声预测模块的预测方法,已被各发动机研发机构和生产厂商所使用。

在进行发动机风扇预测之前,利用现有的某型发动机静态噪声实验数据对算法进行验证。如图2所示,以风扇进口噪声在某一转速下各频率预测值与实验值的误差为例,噪声预测值的误差基本小于等于5 dB,这个误差在噪声预测标准中是可以接受的。证明利用Matlab编程建立的算法是可行的。

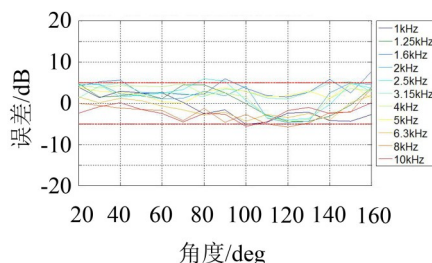


图2 风扇进口噪声预测结果与实验值的误差(4 000 r/min)

3 预测实例

以CFM56-7B发动机为例,对风扇静态噪声进行预测。该型发动机是CFM公司为满足飞机低油耗、低噪声、低污染的要求在CFM56-3的基础上设计的。

3.1 参数设定

关于环境参数,选取与某次发动机地面静态噪声实验相同的条件,如表1所示。

表1 环境参数表

环境参数	
海拔高度/m	328
温度/K	296
压强/Pa	97 450
测量点距噪声源距离/m	45.7

CFM56-7发动机风扇几何参数如表2所示。

对于风扇性能参数,在地面试车条件下,发动机处于静止状态,来流马赫数为0。风扇叶尖设计马赫数为1.2,而进口空气质量流量和通过风扇的总温升会随着转速的变化而变化,选取有代表性的进近转速3 000 r/min、横测转速4 800 r/min和起飞转速5 200 r/min,如表3所示。

表2 风扇几何参数表

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

表3 风扇性能参数表

转速/ (r·min ⁻¹)	风扇进口空气质量流量/ (kg·s ⁻¹)	通过风扇 总温升/k
3 000	113.46	13.0
4 800	190.53	35.3
5 200	210.00	42.5

3.2 预测结果

在转速为3 000 r/min时,画出风扇进口、出口噪声在不同角度下(每隔30°)的声压级曲线。如图3所示,在角度0°~60°范围内,风扇进口噪声较为显著,角度大于90°后,风扇进口噪声的影响很弱,并且随着角度增大而减小;而如图4所示,在角度60°~150°范围内,风扇出口噪声较为显著。

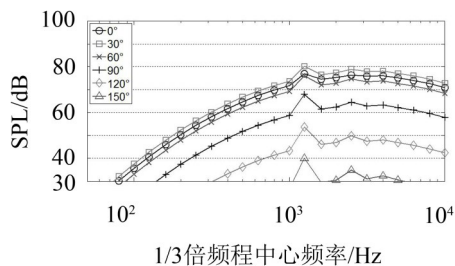


图3 风扇进口噪声声压级(3 000 r/min)

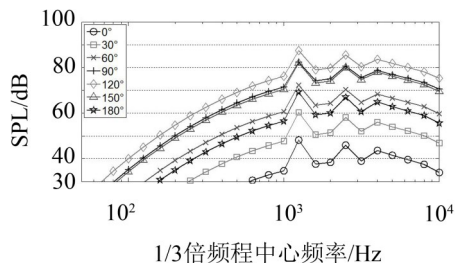


图4 风扇出口噪声声压级(3 000 r/min)

选取典型的角度,对比风扇进口噪声与风扇出口噪声。风扇进口噪声在40°时最为显著(见图5),之后随着角度的增大逐渐减弱,并在70°时与风扇出口噪声几乎持平(见图6)。风扇出口噪声的极值出现在130°(见图7),此时发动机风扇进口噪声的影响已很微弱。

在以上图像中还可以发现,无论是风扇进口噪

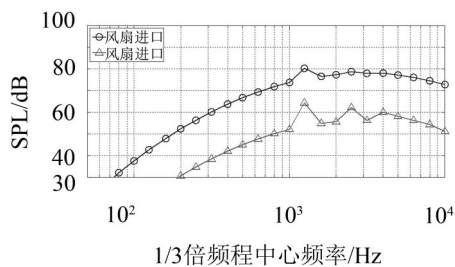


图5 风扇噪声声压级(3 000 r/min, 40°)

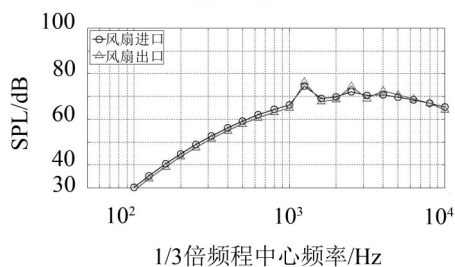


图6 风扇噪声声压级(3 000 r/min, 70°)

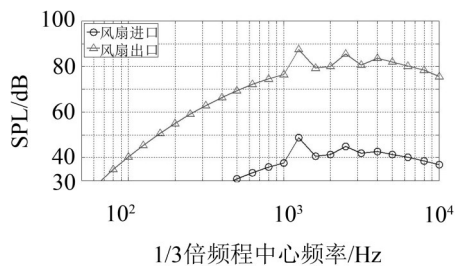


图7 风扇噪声声压级(3 000 r/min, 130°)

声还是风扇出口噪声,各角度下都会出现峰值,这是由离散单音噪声引起的。离散单音噪声出现在风扇叶片通过频率及其倍频上。例如,在3 000 r/min转速地面面试车情况下,该发动机风扇叶片通过频率为1 200 Hz,则离散单音噪声出现在1 200 Hz、2 400 Hz、3 600 Hz等频率上。以60°角为例,风扇进出口噪声声压级如图8所示。

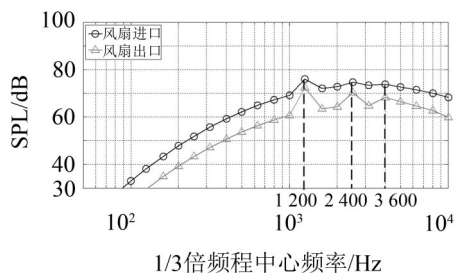


图8 风扇噪声声压级(3 000 r/min, 60°)

而当风扇转速为4 800 r/min时,风扇叶尖相对马赫数大于1,跨越音速,此时叶片前缘会产生激波,进而产生组合单音噪声,从风扇进口处辐射。在风扇的声压级曲线中,可以发现,风扇进口噪声形状也发生了变化。低频段的风扇进口噪声要比叶尖亚音速的情况要高,且随着角度增大,风扇进口低频段噪

声的下降幅度减弱,甚至在 90° 以上的角度下,风扇进口噪声在低频段部分仍然有高于 80 dB 的点(见图9)。可以得出结论,随着转速的升高,当风扇叶尖相对速度跨越音速后,由于组合单音噪声的出现,风扇进口噪声在各角度下均显著提高。

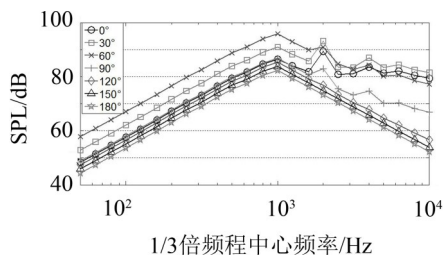


图9 风扇进口噪声声压级(4 800 r/min)

3.3 风扇噪声对发动机整体噪声的贡献

研究在起飞转速下(5 200 r/min)CFM56-7B 发动机风扇噪声对发动机整体噪声的贡献量,如图10所示。在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 测量范围内,风扇进口噪声的感觉声压级相对最大,该噪声源占主导地位。由于风扇噪声具有方向性,在大于等于 90° 的时候,风扇进口噪声明显减弱,甚至低于核心机产生的噪声。在 120° 时,风扇出口噪声的感觉噪声级相对最大,该噪声占主导地位。其他角度下,风扇喷流噪声最为显著。而发动机整体噪声的极值出现在 120° (115.6 dB),可以说在这一角度附近,发动机的噪声污染最为严重。

对于当今民航领域广泛应用的大涵道比涡扇发动机,风扇噪声与喷流噪声是发动机噪声的最主要来源,两者也处于同一量级^[5]。所以,在发动机降噪技术的研究工作中,也应该以降低这两者的噪声为主要目标。

4 结语

利用 Heidmann 大风扇修正噪声预测模型可以较好地预测大涵道比涡扇发动机的风扇噪声。得到了 CFM56-7B 发动机风扇噪声预测数据库,可供后续研究使用。预测结果显示:

(1) 风扇噪声声压级受角度和频率的影响,风扇进口、出口噪声具有明显的方向性;

(2) 风扇噪声的离散单音噪声组分出现在风扇叶片通过频率及其倍频上;

(3) 当风扇叶尖相对马赫数大于1时,在风扇进口开始出现组合单音噪声,使得风扇进口噪声增大,声压级曲线也发生变化;

(4) 大涵道比涡扇发动机噪声的最主要噪声源是风扇噪声和喷流噪声,两者也处于同一量级;

(5) 对于某一大涵道比涡扇发动机风扇,只要获得其几何参数和性能参数,就可以通过文中的方法对其噪声进行预测。

参考文献:

- [1] 金奕山. 民用航空器噪声合格审定概论[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013.
- [2] HEIDMANN M F. Interim prediction method for fan compressor source noise[J]. NASATMX-71763, 1975.
- [3] KONTOS K B, KRAFT B E, GLIEBE P R. Improved NASA- ANOPP noise prediction computer code for advanced subsonic propulsion systems[R]. NASA,1996.
- [4] 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.
- [5] 刘波,王掩刚,高丽敏. 涡扇发动机噪声控制技术分析[J]. 民用飞机设计与研究,2000(4):11-13.

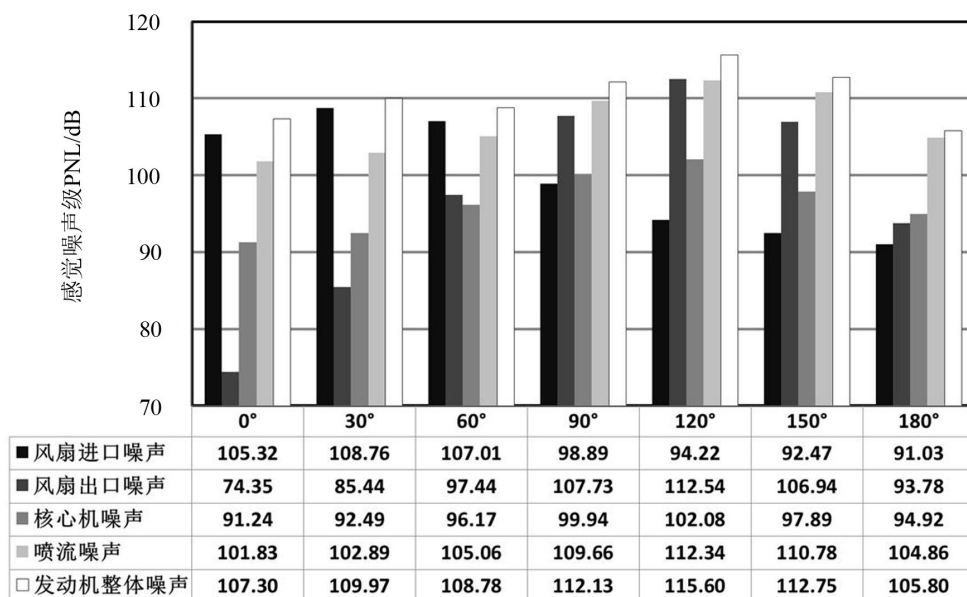


图10 发动机各部件感觉噪声级PNL