

推力螺旋桨噪声试验

周家检^{1,2}, 郝璇¹, 付增良¹, 梁彬¹, 周平¹

(1. 中国航天科技集团有限公司

中国航天空气动力技术研究院 第二研究所, 北京 100074;

2. 中国空气动力研究与发展中心 气动噪声控制重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对某推力螺旋桨开展了噪声测试, 获得了定桨矩角、不同转速工况的螺旋桨噪声频谱特性和典型工况下的螺旋桨噪声辐射指向性, 分析了螺旋桨噪声与转速、桨矩角的变化规律, 以及螺旋桨的纯音噪声、宽频噪声和总噪声的辐射指向性。结果表明: 随桨矩角和转速增大, 宽频噪声在总噪声中占比增大, 在大桨矩角、高转速下, 宽频噪声强度已与纯音噪声相当。宽频噪声辐射指向性与螺旋桨桨叶自噪声相符。

关 键 词: 推力螺旋桨; 宽频噪声; 纯音噪声; 桨叶自噪声; 辐射指向性

中图分类号: V216.54 **文献标志码:** A

Noise tests of pusher-propeller

ZHOU Jiajian^{1,2}, HAO Xuan¹, FU Zengliang¹, LIANG Bin¹, ZHOU Ping¹

(1. The Second Institute, China Academy of Aerospace Aerodynamics,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100074, China;

2. Key Laboratory of Aerodynamic Noise Control,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: The noise of a pusher-propeller was tested. The noise frequency spectrum characteristics of propeller at different revolution speeds with fixed pitch were obtained to research the noise level varying with revolution speed and pitch. The directivity characteristics at typical operating condition were also tested to get the directivity of tone noise, broadband noise and overall noise. The results showed that as the revolution speed and pitch increased, the contribution of broadband noise to overall noise increased. The broadband noise was comparable with the tone noise at large pitch and high revolution speed. The directivity of broadband noise agreed with the characteristics of blade self-noise. It is probable that the broadband noise is dominated by blade self-noise.

Key words: pusher-propeller; broadband noise; tone noise; blade self-noise; directivity

莱特兄弟实现人类首次动力飞行便是使用了螺旋桨作为飞机推进系统, 到二次世界大战结束, 一度统治了天空达 40 年之久。直到 20 世纪 50 年代中期, 随着涡喷和涡扇推进技术的不断完善,

民机开始使用喷气推进技术。近几十年几乎所有的民用大中型客机均使用了涡扇推进技术。但螺旋桨并没有消失, 由于中低速推进效率高的特点, 被军用运输机、小型通航飞机和中低速无人机所

青睐。相比涡扇发动机,螺旋桨的弱点在于噪声和振动较大。

国外对螺旋桨噪声开展了大量的理论、试验和预测方面的研究^[1-10]。国内陈小剑^[11]对空气螺旋桨噪声产生的机理及降低噪声的措施展开了研究工作。李晓东等^[12-13]开展了螺旋桨气动设计和试验验证,并对两个缩比模型螺旋桨进行了声学性质对比试验。丁存伟等^[14]对某螺旋桨构型进行了低噪声设计,并开展试验验证。顾树青等^[15]对不同弦长分布、低前进比螺旋桨气动噪声进行风洞试验研究。艾延廷等^[16]对某型电动螺旋桨飞机开展了螺旋桨降噪设计,并通过外场试验验证了降噪效果。研究表明,螺旋桨噪声可以分为旋转噪声和宽频噪声两部分^[17]。螺旋桨旋转噪声主要包括厚度噪声和定常载荷噪声^[10],为离散噪声,其频率与螺旋桨转速密切相关。旋转噪声具有显著的辐射指向性^[11]。宽频噪声主要包括湍流吸入(turbulence ingestion)噪声、桨叶-尾迹干涉(blade-wake interaction, BWI)噪声和桨叶自噪声^[10]。在均匀来流条件下,旋转噪声是螺旋桨噪声的重要组成部分。

推力螺旋桨前方来流受机身、机翼及尾翼翼尾流的影响,会增加总噪声,甚至会改变纯音分量^[18],导致噪声产生机理更加复杂,宽频分量对总噪声的贡献更加重要。针对推力螺旋桨噪声研究较少,本文对某安装推力螺旋桨的飞机进行了动力系统噪声测试,获取了定桨矩角情况下、不同转速工况的螺旋桨噪声数据,以分析螺旋桨噪声与转速、桨矩角的变化规律。在此基础上进行了典型工况下螺旋桨噪声辐射指向性测试,分析螺旋桨的纯音噪声、宽频噪声和总噪声的辐射指向性。最后,分析了螺旋桨宽频噪声的产生原因。

1 试验设置

本次噪声测试是在某通航机场停机坪进行的,在测试设备一侧距离 100 m 位置有 1 座 2 层建筑物,其余 3 面 500 m 范围内无声学障碍物。测试区域为硬化地面,测试区域外为平坦的砂砾草地,无吸声特性过大的茂密、高大的杂草或灌木、树林。螺旋桨为定速变矩螺旋桨,叶片数为 3,直径为 D ,为推力桨,安装在飞机机尾,螺旋桨中心离地高度为 1.7 m。

1.1 测试内容

为获取螺旋桨噪声随桨矩角、转速的变化规

律开展了定桨矩角、不同转速工况下螺旋桨噪声测试,测试工况如表 1 所示,表中 n 为转速, n_r 为额定转速。同时开展了典型工况下螺旋桨噪声辐射指向性测试,以获得螺旋桨总噪声及主要分量的辐射指向性,测试工况如表 2 所示。

表 1 定桨矩角测试工况表
Table 1 Test matrix: fixed pitch

桨矩角/(°)	$(n/n_r)/\%$
7.2	80,90,100,109
18.4	80,90,100,111
20.0	75,100,111
27.3	70,77,92

表 2 典型工况表
Table 2 Test matrix: variable pitch

油门开度/%	$(n/n_r)/\%$
82	100
97	110
100	110
100	114

1.2 噪声测试系统

辐射指向性测试使用了半圆形阵列,以螺旋桨中心为圆心、半径为 10 倍螺旋桨直径,由间隔 6° 的 30 个麦克风构成,如图 1 所示,图中为测量飞机右侧噪声辐射指向性的测试系统布置。飞机以螺旋桨为中心在地面旋转 180° 放置,可测量飞机左侧的噪声辐射指向性。

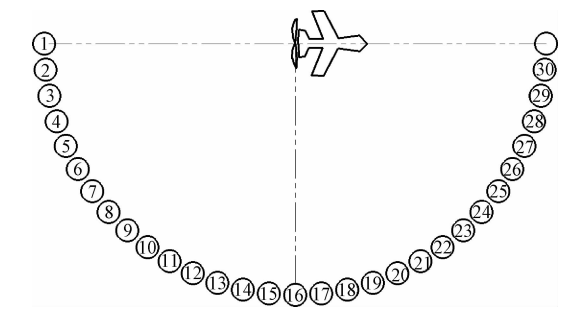


图 1 辐射指向性测试系统示意图
Fig.1 Sketch of directivity test setup

定桨矩角、不同转速工况下螺旋桨噪声测试中只使用一个麦克风。麦克风布置在螺旋桨平面内,在飞机左侧 90° 方向上,距离螺旋桨中心 10 倍螺旋桨直径,平面位置如同图 1 中 16 号测点。麦克风

使用支架支撑,距离地面 1.2 m,朝向螺旋桨中心。

噪声测试中使用的麦克风为 PCB 378B02 麦克风,配置了 PCB 079A07 防风罩。噪声数据通过 32 通道东华 8302 动态数据数据系统记录。使用了 PCB CAL250 标准声源对麦克风进行标定。

2 数据处理

2.1 频谱分析

噪声测试中,一次开车测试了多个工况,截取各工况对应的噪声数据进行频谱分析。定桨矩角噪声测试的每个工况噪声数据长度约 20 s,典型状态噪声测试的每个工况噪声数据长度约 10 s,采样频率为 51.2 kHz。对噪声数据分段进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT),数据段点数为 65 536,频谱分辨率为 0.78 Hz。对多段噪声数据的 FFT 结果取谱平均,以减小随机噪声。为减小谱泄漏,使用了汉宁窗函数。

噪声频谱中使用了无量纲频率斯特劳哈尔数 Sr

$$Sr = \frac{fD}{V}$$

式中特征长度取螺旋桨直径 D ;速度 V 取螺旋桨叶尖速度; f 为噪声频率。由于地面开车状态下远处来流速度为零,故忽略螺旋桨滑流速度,直接使用叶尖旋转速度作为叶尖速度。不同转速工况下与转速相关的主要噪声分量的斯特劳哈尔数相同,谱线变得清晰。

2.2 噪声级计算

噪声级计算的频率范围取为 80~5 000 Hz。主要考虑了以下两点:一是处于螺旋桨滑流中的麦克风产生了额外的低频宽带噪声,并随频率增大而减弱,在 80 Hz 时已低于附近螺旋桨噪声分量 20 dB;二是螺旋桨噪声主要集中在 80~5 000 Hz。取该频率范围进行噪声级计算,去除了螺旋桨滑流产生的大部分额外低频噪声,又保留了螺旋桨主要噪声分量,其结果能够较好地衡量螺旋桨噪声水平。

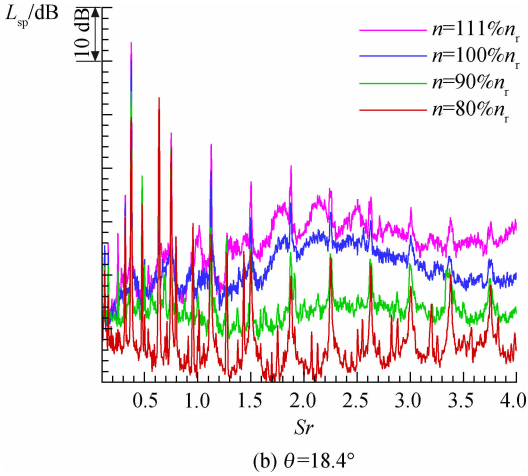
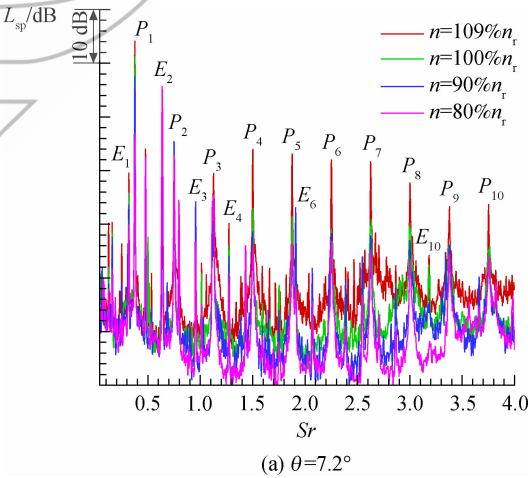
分别计算纯音噪声、宽频噪声和总噪声的噪声级,以及 A 计权声压级。本文中将频谱中带宽小于等于 6 Hz 的离散噪声作为纯音噪声,纯音噪声以外的噪声分量均作为宽频噪声。纯音噪声包括了发动机和螺旋桨的离散噪声。需要说明的是,螺旋桨噪声、发动机噪声的高阶离散噪声分量被宽频噪声所掩盖,无法分别计算该频段内的纯

音分量和宽频分量,一并计入了宽频噪声。

3 定桨矩角噪声测试结果

3.1 定桨矩角噪声频谱

图 2 给出了定桨矩角不同转速工况下的螺旋桨噪声频谱,桨矩角(θ)分别是 7.2°、18.4°、20.0°和 27.3°。桨矩角取的是 75% 半径处桨叶翼型与螺旋桨旋转平面的夹角。图中 P_1 、 $\cdots$ 、 P_{10} 表示 1~10 阶螺旋桨噪声分量, E_1 、 $\cdots$ 、 E_{10} 表示 1~10 阶螺旋桨驱动系统噪声分量, n 为转速, n_r 为额定转速, L_{sp} 为声压级。从图中可以看到螺旋桨噪声主要由宽频噪声和与转速相关的纯音噪声构成,宽频噪声呈现出连续多个峰值,与文献[14]中螺旋桨噪声频谱类似。定桨矩角情况下,宽频噪声随转速增大而增大,如 $\theta=20.0^\circ$ -100% n_r 工况下的宽频噪声已经覆盖了无量纲频率 Sr 为 2 以上的螺旋桨纯音噪声。对不同桨矩角、相同转速的螺旋桨噪声频谱进行了横向对比,图 3 给出了 100% n_r 对比情况,可以看到相同转速下,桨矩角越大,其宽频噪声越大。



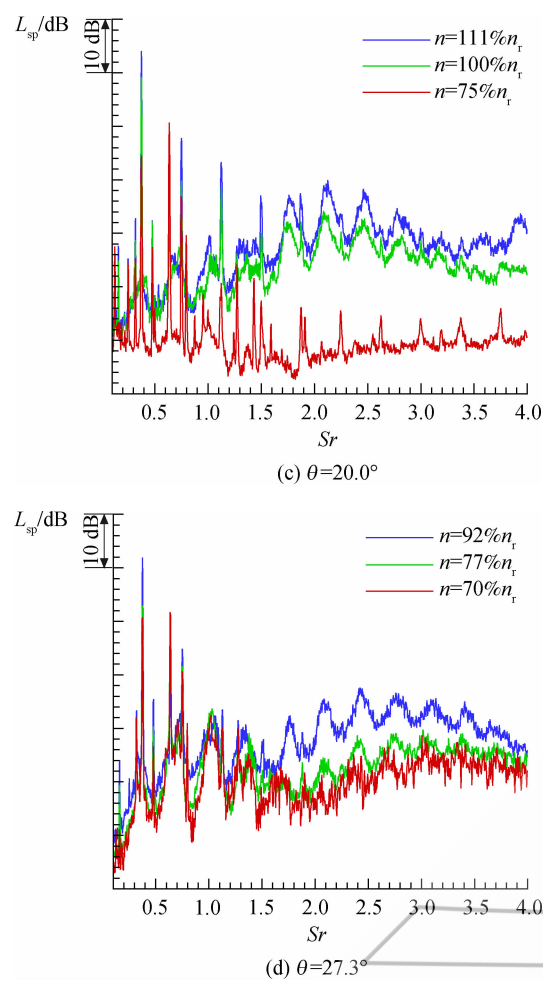


图 2 定桨矩角工况的螺旋桨噪声频谱
Fig. 2 Noise spectra of propeller with fixed pitches

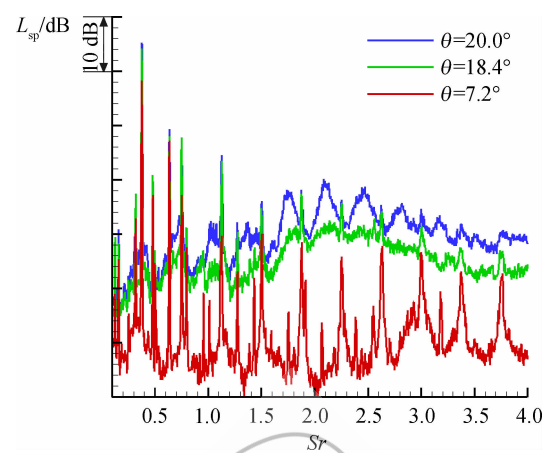


图 3 100% n_r 的螺旋桨噪声频谱
Fig. 3 Noise spectra of propeller at 100% n_r

3.2 纯音、宽频噪声级

表 3 给出了定桨矩角下、不同转速工况螺旋桨噪声的纯音噪声、宽频噪声、总噪声和 A 计权声压级的相对值,以 $\theta=7.2^{\circ}$ ~ $80\%n_r$ 工况的总噪声级为参考值。从纯音噪声和宽频噪声的对比情况来看, 7.2° 小桨矩角状态下的纯音噪声占据主导地位,宽频噪声比纯音噪声小 10 dB 以上;而中等桨矩角、大桨矩角下的较大转速状态下宽频噪声与纯音噪声相当,大部分只比纯音噪声低 1~2 dB;横向对比 100% n_r 下不同桨矩角的纯音噪声和宽频噪声情况, 7.2° 桨矩角下宽频噪声比纯音噪声低 12.6 dB, 18.4° 桨距角下低 4.1 dB, 20° 桨矩

表 3 相对噪声级
Table 3 Relative noise levels

桨矩角/($^{\circ}$)	转速	声压级/dB			
		纯音噪声	宽频噪声	总噪声级	A 计权
7.2	80% n_r	−0.4	−10.6	参考值	−9.2
	90% n_r	2.5	−10.5	2.8	−8.1
	100% n_r	5.2	−7.4	5.4	−5.6
	109% n_r	7.9	−3.0	8.3	−0.1
18.4	80% n_r	3.5	0.2	5.2	−5.2
	90% n_r	6.7	−0.8	7.4	−0.2
	100% n_r	11.1	7.0	12.5	7.5
	111% n_r	14.2	13.4	16.8	13.4
20.0	75% n_r	2.5	−0.5	4.3	−2.8
	100% n_r	12.9	11.6	15.3	11.6
	111% n_r	17.0	16.1	19.6	16.3
27.3	70% n_r	6.3	3.4	8.1	3.2
	77% n_r	3.4	7.3	8.8	6.2
	92% n_r	14.8	13.3	17.2	12.7

角下低 1.3 dB。可见在定转速情况下,随着桨矩角增大,宽频噪声对总噪声的贡献越来越大。从 A 计权声压级结果来看,A 计权声压级随着宽频噪声在总噪声中的贡献增大而增大。

4 典型状态噪声测试结果

4.1 纯音、宽频噪声辐射指向性

图 4 给出了螺旋桨典型状态下的纯音噪声、宽频噪声和总噪声的辐射指向性,工况分别为油门开度 82%-100% n_r 、油门开度 97%-110% n_r 、油门开度 100%-110% n_r 、油门开度 100%-114% n_r 。图中“OASPL”为总噪声声压级,“tone”为纯音噪声声压级,“broadband”为宽频噪声声压级。图中“nose”、“tail”和“pipe”表示飞机的机头在右、机尾在左、有发动机排气管在飞机右侧(图中下侧)。从辐射指向性来看,侧向的纯音噪声最强,飞机左侧(图中上侧)最强在 108°附近,飞机右侧(图中下侧)最强在-84°附近。左右两侧的辐射指向性存在差异,其原因可能是飞机右侧的发动机排气管给右侧带来了更强的发动机噪声纯音分量。而宽频噪声在飞机前向和后向较强,飞机左侧(图中上侧)最强在 150°附近,飞机右侧(图中下侧)最强在-138°附近,前向最强均在 30°附近。较小功率状态下,如油门开度 82%-100% n_r ,宽频噪声对总噪声的贡献较小,总噪声辐射指向性曲线和纯音噪声很接近;而随着油门开度和转速的增加,宽频噪声对总噪声的贡献逐渐增大,在±30°和±150°附近的方向上,已经超过了纯音噪声,总噪声辐射指向性受宽频噪声辐射指向性的影响越来越大。飞机后向(180°附近)的总噪声、纯音噪声和宽频噪声出现轻微跳动,其原因是该方向的麦

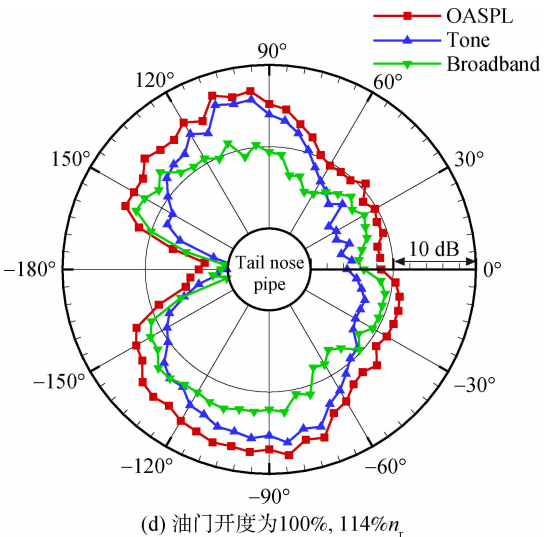
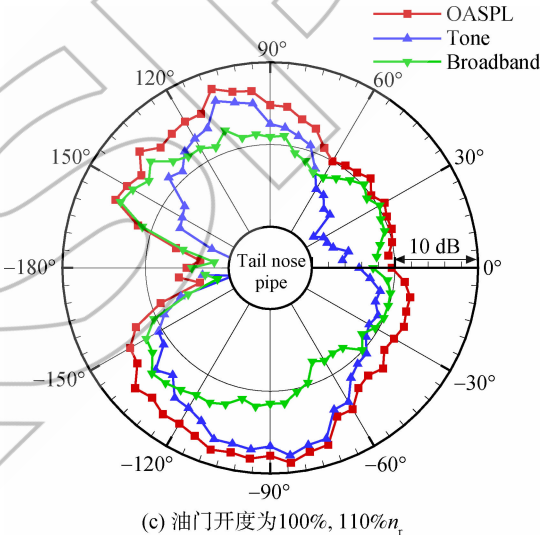
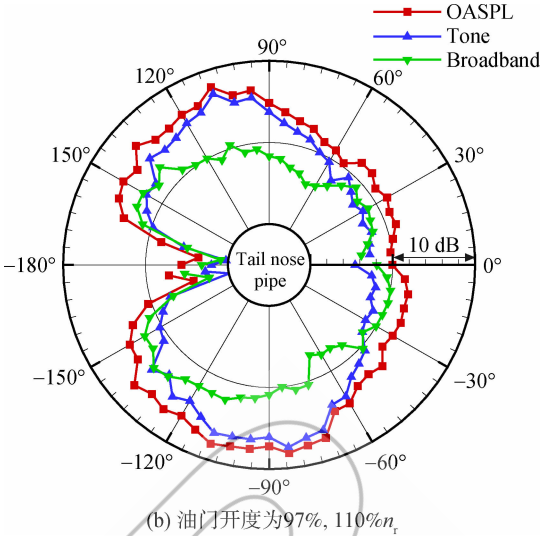
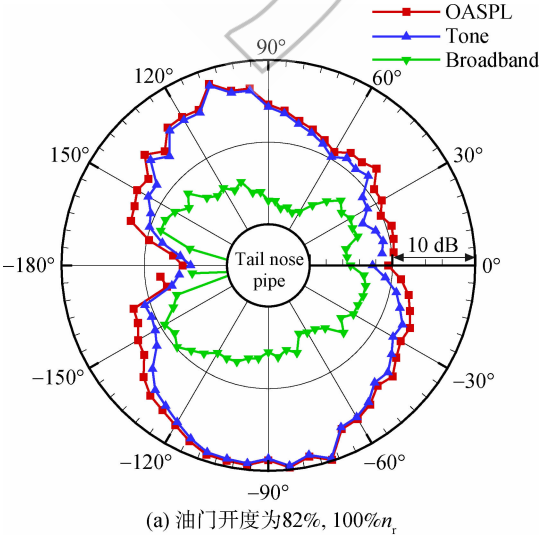


图 4 典型工况下噪声的纯音分量、宽频分量和总噪声的辐射指向性

Fig. 4 Directivity of tone noise, broadband noise and total noise in typical operating condition

克风处于螺旋桨滑流之中,产生了额外的噪声,虽然按照文中第 2.2 节给出的噪声级计算方法去除了大部分额外噪声,残留部分仍然产生了影响。

4.2 不同辐射方向噪声频谱

图 5 给出了地面开车噪声测试中不同辐射角度(α)的螺旋桨噪声频谱对比。选取了图 4(d)中纯音噪声和宽频噪声的最大辐射方向,辐射角度 $\alpha=30^\circ$ 和 150° 为宽频噪声较大的方向,而 $\alpha=108^\circ$ 为纯音噪声最大的方向。从图中可以看到,除油门开度 $82\%-100\%n_r$ 工况宽频噪声较小以外,其余 3 个工况、不同方向宽频噪声的最大峰值频率存在较大差异: 150° 、 108° 、 30° 轴射方向上的最大峰值无量纲频率 Sr 分别为 1.70、0.99、2.12。

图 6 给出了地面开车噪声测试中飞机左右两侧 108° 方向的螺旋桨噪声频谱对比,也给出了飞机右侧总噪声最强的一 84° 方向的频谱。从图中可以看到,飞机左右两侧的宽频噪声频谱没有明显差异。纯音噪声方面,1 阶螺旋桨噪声在这 3 个方向上相差很小。而 2 阶螺旋桨噪声相差较大, 108° 方向最大,一 84° 方向略小,一 108° 方向最小,比 108°

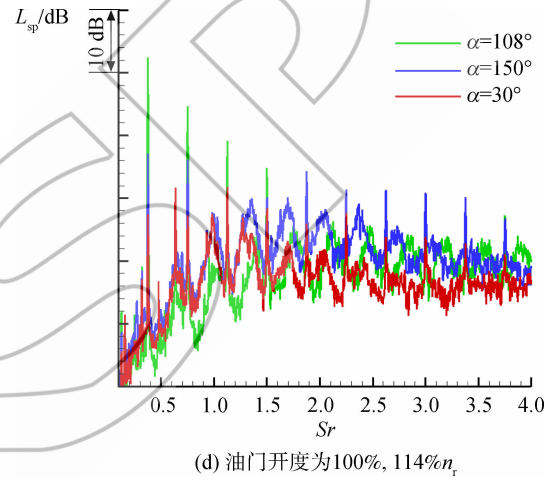
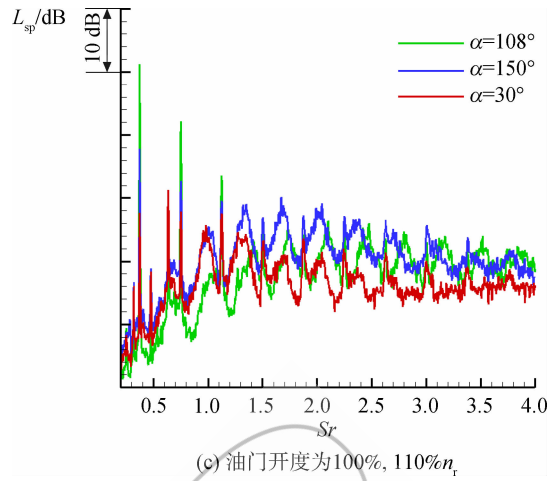
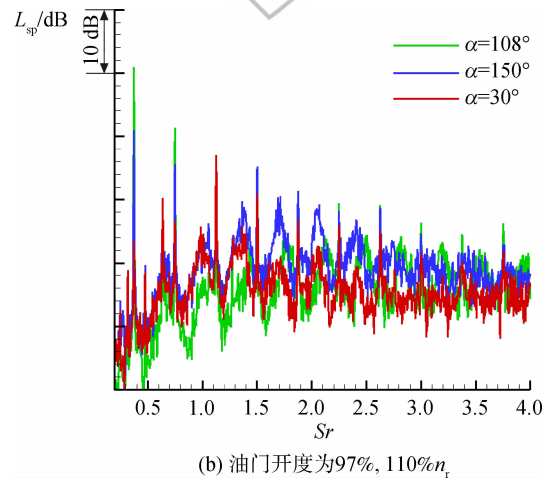
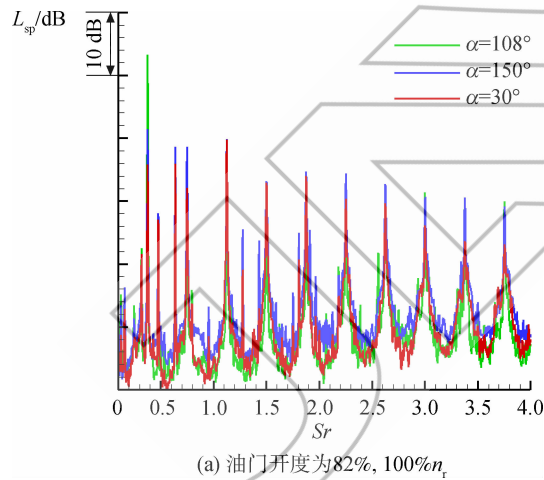


图 5 典型工况下不同辐射方向的噪声频谱
Fig. 5 Noise spectra from different directions under typical working conditions

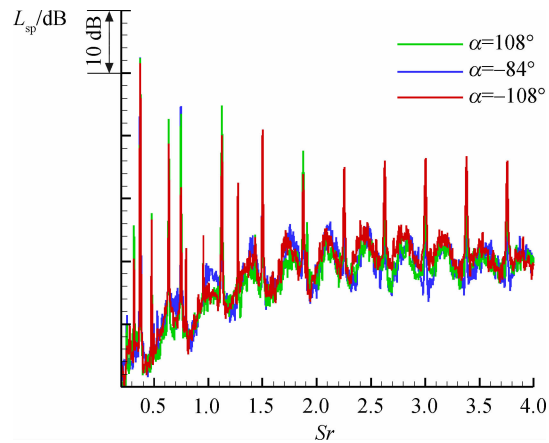


图 6 飞机左右两侧的噪声频谱对比
(油门开度 $100\%-114\%n_r$)
Fig. 6 Noise spectra from two sides of the aircraft
(throttle- $100\%, 114\%n_r$)

方向小了 12.8 dB。3 阶螺旋桨噪声也存在差异, $\pm 108^\circ$ 方向相当,一 84° 方向要大 5.7 dB。

5 宽频噪声分析

从定桨矩角、不同转速噪声测试结果来看(文中第3节),定桨矩角情况下,宽频噪声随转速增大而增大;定转速情况下,宽频噪声随桨矩角增大而增大。前已述及,螺旋桨噪声频谱与丁存伟等^[14]给出某拉力螺旋桨风洞试验噪声频谱类似,同样呈现出连续多个宽频峰值。因此,可以认为宽频噪声主要来源于螺旋桨。宽频噪声随桨距角和转速的变化规律与桨叶自噪声相似。

辐射指向性测试中,测试工况的桨矩角在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间,而75%半径以外的主要噪声区域——桨尖区域的桨叶翼型与螺旋桨旋转平面夹角大于桨矩角,接近 30° 。翼型自噪声呈现“8”字形辐射指向性^[19],侧向最强,上游和下游最弱,并随着翼型攻角旋转。当螺旋桨桨叶旋转到上方时,桨叶自噪声辐射指向性如图7中实线所示,当桨叶旋转到下方时,桨叶自噪声辐射指向性如图7中虚线所示,而桨叶旋转到其他位置时,桨叶自噪声辐射指向性在两者之间。图7所示螺旋桨桨叶自噪声与图4给出的宽频噪声辐射指向性极为相似,该宽频噪声可能来自桨叶自噪声。螺旋桨噪声以纯音噪声为主,而本文中推力螺旋桨在高功率状态下的宽频噪声已经与纯音噪声相当,其原因可能是机身和尾翼导致的非对称来流作用于桨叶,与桨叶自噪声形成耦合,进一步增强了宽频噪声的幅值。

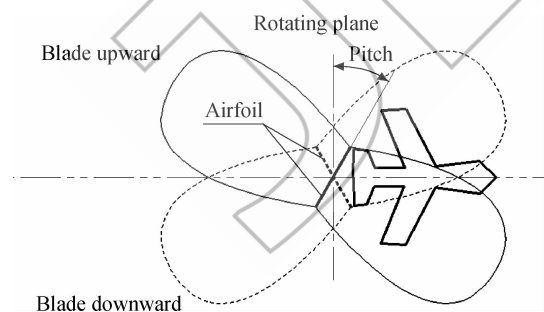


图7 螺旋桨桨叶自噪声辐射指向性示意图

Fig. 7 Directivity of the rotor blade self noise

6 结论

本文对某推力螺旋桨开展了噪声测试,获取了定桨矩角、不同转速工况下噪声和典型工况下的噪声辐射指向性,分析了螺旋桨的纯音噪声、宽频噪声和总噪声的辐射指向性,得出以下结论:

1) 推力螺旋桨噪声主要包括纯音噪声和宽

频噪声,纯音噪声和宽频噪声均随桨矩角和转速的增大而增大。

2) 定桨矩角情况下,随转速增大宽频噪声在总噪声中占比增大;相同转速下,随着桨矩角增大,宽频噪声对总噪声的贡献越来越大;在大桨矩角、高转速下,宽频噪声已经与纯音噪声相当。

3) 宽频噪声主要来自于螺旋桨,其辐射特性以及随桨距角、转速变化特性符合桨叶自噪声特性。

4) 推力螺旋桨纯音噪声和宽频噪声的最大噪声辐射方向呈近 90° 夹角,其辐射指向性具有互补性,且高功率状态下宽频噪声对总噪声贡献显著。

参考文献:

- [1] LYNAN E J H. The emission of sound by airscrews[R]. Washington DC: Advisory Committee for Aeronautics Report No. 624, 1919.
- [2] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically: I general theory[J]. Mathematical and Physical Sciences, 1952, 211(1107): 564-587.
- [3] FFOWCS W J E, HALL L H. Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 40(4): 657-670.
- [4] CRIGHTON D G. Radiation from vortex filament motion near a half-plane[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 51(2): 357-362.
- [5] AMIET R. Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream[J]. Journal of Sound and Vibration, 1975, 41(4): 407-420.
- [6] AMIET R K. Noise due to turbulent flow past a trailing edge[J]. Journal of Sound and Vibration, 1976, 47(3): 387-393.
- [7] BROOKS T F, POPE D S, MARCOLINI M A. Airfoil self-noise and prediction[R]. NASA-RP-1218, 1989.
- [8] ERNSTHAUSEN W. The source of propeller noise[R]. NACA TN 825, 1937.
- [9] ROGER M, MOREAU S. Broadband self-noise from loaded fan blades[J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 536-544.
- [10] BROOKS T F, MARCOLINI M A, POPE D S. Main rotor broadband noise study in the DNW[J]. Journal of American Helicopter Society, 1989, 34(2): 3-12.
- [11] 陈小剑. 空气螺旋桨噪声[J]. 噪声与振动控制, 1983(5): 23-29.
- [12] 李晓东, 孙晓峰, 胡宗安. 一种螺旋桨的气动声学设计与实验验证[J]. 航空动力学报, 1991, 6(4): 317-319.
LI Xiaodong, SUN Xiaofeng, HU Zongan. Aeroacoustical modification of a propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(4): 317-319. (in Chinese)
- [13] 李晓东, 孙晓峰, 胡宗安, 等. 两个模型螺旋桨声场性质的实

验研究[J]. 航空动力学报, 1993, 8(2): 121-124.

LI Xiaodong, SUN Xiaofeng, HU Zongan, et al. Acoustic experiments of two scaled-model propellers on the ground [J]. Journal of Aerospace Power, 1993, 8(2): 121-124. (in Chinese)

[14] 丁存伟, 陈宝, 周国成. 螺旋桨低噪声设计与试验验证[J]. 航空学报, 2016, 35(4): 1-7.

DING Cunwei, CHEN Bao, ZHOU Guocheng. Aero-acoustic optimization and wind tunnel test of propeller blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 35(4): 1-7. (in Chinese)

[15] 顾树青, 胡天翔, 刘振臣, 等. 不同弦长分布低前进比螺旋桨气动噪声风洞实验研究[C]//2018 年全国工业流体力学会议论文集. 北京: 中国力学学会流体力学专业委员会, 2018: 80-87.

[16] 艾延廷, 王泽, 王志, 等. 某型螺旋桨飞机气动噪声降噪研究[J]. 热力透平, 2019, 48(2): 113-118.

AI Yanting, WANG Ze, WANG Zhi, et al. Reduction method of aerodynamic noise for a propeller aircraft[J]. Thermal Turbine, 2019, 48(2): 113-118. (in Chinese)

[17] 孙晓峰, 周盛. 气动声学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[18] YIN Jianping, STUERMER A, AVERSANO M. Aerodynamic and aeroacoustic analysis of installed pusher-propeller aircraft configurations[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(5): 1423-1433.

[19] JIANG Min, LI Xiaodong, LIN Dakai. Numerical simulation on the airfoil self-noise at low mach number flows [R]. AIAA-2012-0834, 2012.

(编辑: 陈 越)