

文章编号: 1674-8190(2024)05-148-07

# 对转螺旋桨气动噪声试验系统设计与试验研究

曹琦<sup>1</sup>, 卫凯<sup>1</sup>, 聂彦平<sup>2</sup>, 燕群<sup>1</sup>, 陈永辉<sup>1</sup>

(1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

(2. 航空工业陕西飞机工业(集团)有限公司 设计研究院, 汉中 723000)

**摘要:** 风洞内对转螺旋桨气动噪声试验存在时间协调难、成本高的问题, 依托地面声学环境, 研制能够模拟对转螺旋桨地面开车状态的对转螺旋桨气动噪声试验系统。对某穿孔结构的对转螺旋桨和基准桨开展气动噪声试验, 对设计的试验系统进行验证, 并对穿孔结构对转螺旋桨的降噪效果进行评估。结果表明: 在所测试的工况范围内, 穿孔结构对转螺旋桨在保证气动性能的前提下能够有效降低噪声; 在对飞机舱内影响最显著的 90° 指向角处, 二阶通过频率处降噪量达到 5 dB。本文设计的气动噪声试验系统, 能够为对转螺旋桨气动噪声评估和降噪设计提供帮助。

**关键词:** 对转螺旋桨; 气动噪声; 穿孔结构; 远场噪声; 降噪设计

中图分类号: V211.44; V216.5<sup>+</sup>4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.05.15

## Aeroacoustic test system design and experimental research for counter-rotating propeller

CAO Qi<sup>1</sup>, WEI Kai<sup>1</sup>, NIE Yanping<sup>2</sup>, YAN Qun<sup>1</sup>, CHEN Yonghui<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(2. Design and Research Institute, AVIC Shaanxi Aircraft Industry Co., Ltd., Hanzhong 723000, China)

**Abstract:** The aerodynamic noise test of counter-rotating propellers in wind tunnels has the problems of difficult time coordination and high cost. The aerodynamic noise test system of counter-rotating propellers, which is capable of simulating the driving state of counter-rotating propellers on the ground, is developed by relying on the acoustic environment of the ground. The aerodynamic noise test is carried out on a perforated counter-rotating propeller and a reference propeller to validate the test system and evaluate the noise reduction effect of the perforated counter-rotating propeller. The results show that the perforated counter-rotating propeller can effectively reduce the noise under the prerequisite of guaranteeing the aerodynamic performance in the range of the tested working conditions. In the 90° pointing angle, which has the most significant effect on the aircraft cabin, the noise reduction at the second-order passing frequency reaches 5 dB. The designed aerodynamic noise test system can provide assistance for the evaluation of aerodynamic noise of the counter-rotating propeller and the design of noise reduction.

**Key words:** counter-rotating propeller; aeroacoustics; perforated structure; far field noise; noise reduction design

收稿日期: 2023-11-23; 修回日期: 2024-01-12

基金项目: 中国飞机强度研究所创新基金项目(BYSFMJKY-18-024)

通信作者: 卫凯(1990-), 男, 硕士, 工程师。E-mail: weikai.258@163.com

引用格式: 曹琦, 卫凯, 聂彦平, 等. 对转螺旋桨气动噪声试验系统设计与试验研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(5): 148-154.

CAO Qi, WEI Kai, NIE Yanping, et al. Aeroacoustic test system design and experimental research for counter-rotating propeller [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(5): 148-154. (in Chinese)

## 0 引言

相比于同等推力等级的涡扇发动机,螺旋桨发动机的优势为燃油效率高、机动性好,但也存在螺旋桨直径大导致机构设计复杂、飞行速度较低的劣势。对转螺旋桨又叫对转开式转子,具有两排转向相反的螺旋桨,这使得桨叶数目增多,螺旋桨直径适当减小可以提高巡航马赫数,解决了单排螺旋桨的部分设计难点和缺陷。有数据显示,相比于常规螺旋桨,对转螺旋桨的效率可以提高6%~16%<sup>[1]</sup>。然而,相比于单排螺旋桨,对转螺旋桨前后桨之间的干涉噪声叠加单个螺旋桨的噪声导致其噪声巨大,没有短舱的包裹,噪声直接向飞机舱内和周边环境辐射,严重限制了对转螺旋桨在民用市场的应用和进一步发展<sup>[2-3]</sup>。随着噪声限制趋严,对转螺旋桨的噪声问题亟待解决<sup>[4-5]</sup>。

目前国内外降低对转螺旋桨噪声的方法主要是通过气动声学进行设计,该方向的研究集中在:对转螺旋桨气动噪声的产生机理,气动噪声的数值模拟与试验测试。孙召政等<sup>[6]</sup>通过数值模拟研究了后桨桨距角与对转螺旋桨的气动性能的影响规律;金海波等<sup>[7]</sup>基于计算流体力学(CFD)与计算气动声学(CAA)相结合的方法数值模拟了对转螺旋桨在起降阶段的噪声,结果表明开式转子的峰值辐射噪声主要集中在低频范围;Schnell等<sup>[8]</sup>采用德国宇航院的TRACE方法模拟了开式转子的流场特性,采用Ffowcs Williams-Hawkings(FW-H)<sup>[9]</sup>方法预测远场噪声,并与试验结果进行对比分析噪声机理和降噪思路,最后对桨叶进行气动噪声优化并验证了降噪效果。试验测量方面,Parrya<sup>[10]</sup>阐述了三个典型对转螺旋桨风洞试验,详细分析了其噪声的分布特点;Hoff<sup>[11]</sup>、Elliott<sup>[12]</sup>、Dale等<sup>[13]</sup>相继在实验室建立了风洞内的对转螺旋桨气动噪声试验台,并陆续在低、高速风洞中开展了气动噪声试验,获取大量的试验数据,指导了对转螺旋桨气动噪声优化设计;陈正武等<sup>[14]</sup>、崔盼望等<sup>[15]</sup>为了更方便地评估对转螺旋桨的气动噪声性能,提高噪声优化效率,在全消声室内搭建了小型对转螺旋桨试验台,采用两台电机分别驱动两排螺旋桨,初步研究了气动噪声机理;卫凯等<sup>[16-17]</sup>在半消声环境下搭建了小型开式转子声学试验台和螺旋桨气动噪声试验台,测试了开式转子和螺旋桨在地面开车状态下的远场噪声,

将开式转子的试验结果与数值模拟结果进行对比,初步分析了远场噪声特性并指导了优化设计;孙爽等<sup>[18]</sup>采用传声器阵列测量了发动机地面开车状态下的噪声,识别了噪声源,并与消声室试验结果对比消除了反射误差。上述气动噪声试验验证了在地面声学环境下开展全尺寸螺旋桨或对转螺旋桨气动噪声试验的可行性。

近年来风洞试验任务繁重,试验周期长,组织协调困难,且试验成本高,效费比低,同时受限于试验段尺寸一般仅支持缩比例试验。因此本文针对对转螺旋桨地面开车状态,设计并研制一套适用于地面声学环境的对转螺旋桨气动噪声试验系统,对一套穿孔结构对转螺旋桨和基准桨的气动噪声特性开展试验测试,验证试验系统的功能,评估穿孔结构的降噪效果。

## 1 对转螺旋桨气动噪声试验系统设计

### 1.1 设计依据

对转螺旋桨产生的噪声为飞机的最大声源,在起降阶段的噪声水平尤其显著,且飞机噪声适航审定关注的重点也是起飞、降落等飞行状态<sup>[19-21]</sup>。因此,本文对转螺旋桨气动噪声相关研究主要针对地面起飞状态进行。对转螺旋桨转速主要取决于螺旋桨的直径,常规涡桨飞机螺旋桨直径在2~5 m,转速一般为700~1 500 r/min。对转螺旋桨的前后两排桨叶转速相同,转向相反,一般通过调整两排桨间距和桨叶角实现发动机拉力或功率的改变。

为了在地面声学环境下研究对转螺旋桨的气动噪声特性,需要研发一套对转螺旋桨气动噪声试验系统,该系统应包含对转螺旋桨试验台、气动噪声测试系统、控制系统等,且应具备以下功能:

- 1) 试验台的转速和功率应能满足全尺寸对转螺旋桨试验件和缩比试验件的试验需求。缩比试验件须按照桨尖马赫数相似原则换算,得出试验转速。

- 2) 试验台转轴高度应满足全尺寸级对转螺旋桨安装需求,且应考虑地面和试验台体本身产生的气流扰动。

- 3) 试验台具备双排螺旋桨对转功能,且两排

桨间距可调,桨叶角可调。试验台应具备远程测试和控制功能。

4) 试验台具备对转螺旋桨拉力、扭矩、功率等气动性能参数测量功能,具备远场噪声测量功能。

根据对转螺旋桨应用环境和半消声室基础条件,设计试验系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 气动噪声试验平台主要性能指标  
Table 1 Performance parameters of aeroacoustic test rig

参数	数值
最大转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	6 000
驱动功率/kW	180
拉力测量范围/N	4 000
扭矩测量范围/( $N \cdot m$ )	400
最大安装直径/m	4

## 1.2 对转螺旋桨试验台设计

以半消声作为地面声学环境,设计的对转螺旋桨试验台结构如图 1 所示。试验台包含固定平台、滑动平台、伺服电机、拉力传感器、扭矩传感器、齿轮传动系统、前排螺旋桨和后排螺旋桨。固定平台位于试验台下部分,用于支持试验台。伺服电机安装在滑动平台上,为试验台提供驱动力,滑动平台与固定平台通过滑轨连接。电机通过联轴器、齿轮传动系统向螺旋桨输出动力。齿轮传动系统包含共轴嵌套的内、外两个输出轴,使对转螺旋桨实现同轴、反转。固定平台基于 NACA0012 翼型缩放后设计成流线型外形,以减少试验台体带来的气流扰动。对转螺旋桨安装轴心高 2.3 m,固定平台上的电机、齿轮传动系统使用整流罩包裹,以减低气流扰动和电机、齿轮箱的噪声。

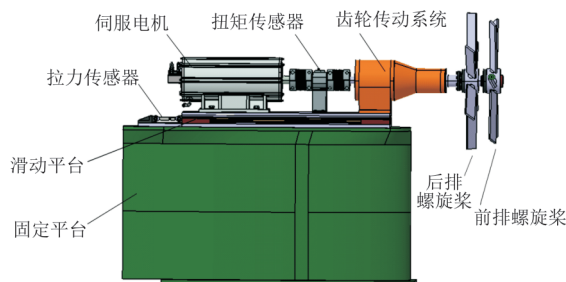


图 1 对转螺旋桨试验台结构示意图

Fig. 1 Counter rotating propeller test rig configuration

## 1.3 气动噪声测试系统和控制系统设计

对转螺旋桨和单排螺旋桨评估气动噪声性能的方法相同,通过拉力、扭矩等气动参数来评估气动性能,通过噪声频谱和指向性评估远场噪声特性<sup>[16-17]</sup>。气动噪声测试系统的主要功能是测量对转螺旋桨旋转时产生的拉力、扭矩和远场噪声。拉力通过安装在试验台滑动平台末端的拉力传感器测得,扭矩通过安装在两个联轴器中间的扭矩传感器测得,远场噪声通过布置在远场适当位置的传声器阵列测得。

控制系统的主要功能是对试验台进行操作,使其旋转和停止,具备异常监测、视频监控和急停功能。控制系统和气动噪声测试系统均布置在半消声室外的专用测控间。

## 2 对转螺旋桨气动噪声试验

### 2.1 试验方案

本次试验在中国飞机强度研究所的  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 8\text{ m}$  的半消声室内进行,试验现场如图 2 所示。对转螺旋桨试验件包括基准桨和穿孔结构桨,通过二者的对比研究降噪效果。基准桨桨叶表面光滑,在后排桨叶吸力面从 80% 叶高至叶顶处,进行打孔设计,每层四个小孔,底部连通,每两个孔之间距离为 2.5 mm,穿孔结构局部图如图 3 所示。两套桨直径均为 660 mm,桨叶均为复合材料,桨毂为铝合金材料。两套对转桨前后排均为 6 片桨叶,桨叶采用 NACA0012 翼型,70% 叶高处桨叶角为  $4^\circ$ ,两排桨间距为 180 mm。

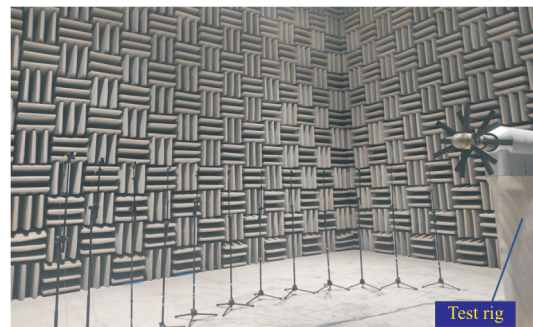


图 2 试验现场照

Fig. 2 Test site photo

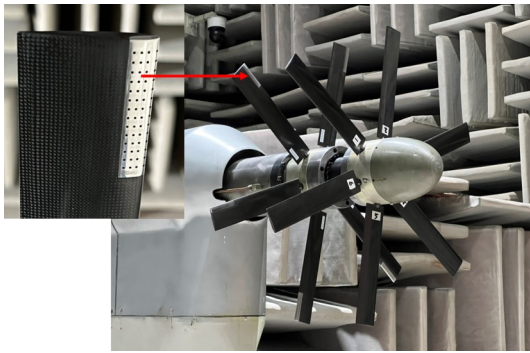


图 3 试验件实物照  
Fig. 3 Test piece photo

以叶尖马赫数相似为准则,确保动力相似,以地面起飞工况为依据,以转速为变量,设计 7 个试验工况,如表 2 所示,研究转速对对转螺旋桨的气动性能、远场噪声的关系。

表 2 试验工况  
Table 2 Test conditions

参数	数值
安装角/(°)	4
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 500,3 000,3 100,3 200,3 300,3 400,3 500

### 2.2 测试方法

本文试验包含气动性能测试和远场噪声测试,气动性能测试主要是获取对转螺旋桨的拉力和扭矩。对转螺旋桨到达预设工况后,可以从控制系统直接读取拉力和扭矩。在半消声室布置传声器阵列,测量远场各噪声观测点声压值。传声器阵列由 12 个 BK4954 型自由场传声器组成,从 40°~150°,相互间隔 10°,布置如图 4 所示。

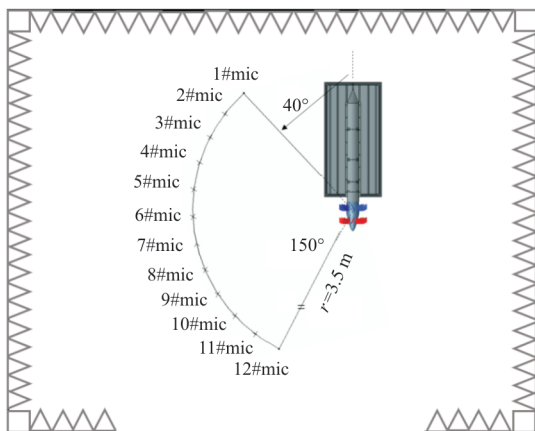


图 4 传声器阵列布置示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of microphone array

传声器均匀分布在以后排螺旋桨旋转中心为圆心,3.5 m 为半径的圆弧上。传声器高度与螺旋桨旋转中心保持一致。试验时,传声器佩戴防风球,目的是减小螺旋桨旋转扰流带来的误差。传声器同时采集 20 s 声压数据,采样频率设为 16 384 Hz,传声器须经过计量校准。

### 2.3 结果与分析

试验结果包括气动性能结果和远场噪声结果。气动性能结果主要通过直接测量的拉力、扭矩和功率评估,远场噪声主要通过噪声频率谱线和指向性评估。

基准桨和穿孔结构对转桨在不同转速工况时的拉力测试结果如图 5 所示,可以看出:两套对转桨的拉力均随着转速升高而增大,二者变化趋势基本一致,差值最大为 1 N;在所测转速范围内,基准桨和穿孔结构桨的拉力值在 25~35 N,相对较小,这是桨叶直径和桨叶角偏小导致的。整体来看,相比于基准桨,穿孔结构桨没有因为吸力面打孔而造成明显的拉力损失。

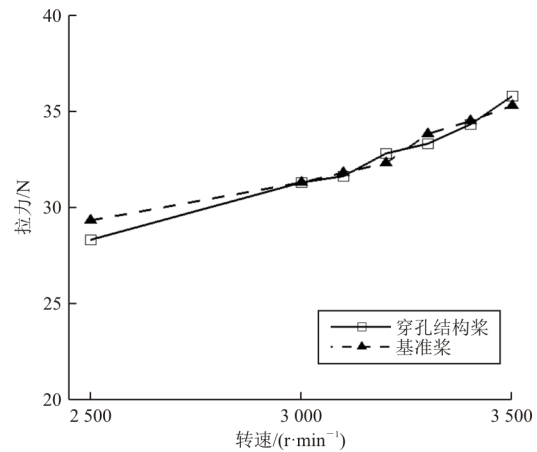


图 5 拉力试验结果  
Fig. 5 Thrust data of test

基准桨和穿孔结构对转桨在 2 500~3 500 r/min 范围内的扭矩测量结果如图 6 所示,可以看出:两套对转桨的扭矩均呈增大趋势,且增幅相似;在所测范围内,两套对转桨的扭矩值在 10 N·m 附近,两套桨差值最大不超过 1 N·m,相对较小。两套桨测得的扭矩值偏小,这是桨叶角偏小导致的,穿孔结构没有引起对转螺旋桨的扭矩损失。

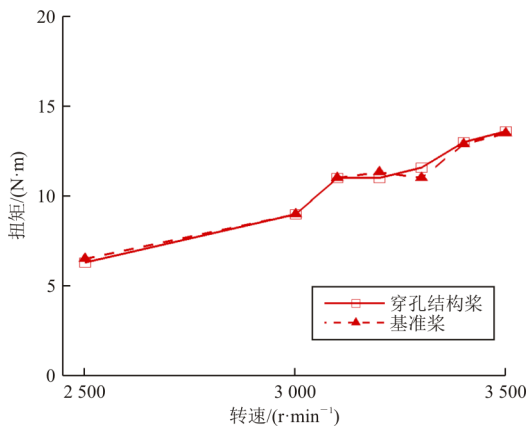


图6 扭矩试验结果

Fig. 6 Torque data of test

对转螺旋桨的功率可以通过公式(1)计算得出。

$$P = 9549 \frac{M}{n} \quad (1)$$

式中: $P$ 为功率; $M$ 为测得的扭矩; $n$ 为对转螺旋桨转速。

基准桨和穿孔结构桨在不同转速工况时的功率结果如图7所示,可以看出:两套桨的功率变化趋势基本一致,在2500~3000 r/min区间,功率基本保持不变;在3100 r/min处,功率小幅减小;3100~3500 r/min区间,功率持续增大,说明3100~3500 r/min更接近于两套桨的设计区间。

通过对比基准桨和穿孔结构桨的拉力、扭矩和功率,两套桨的气动性能基本保持一致,穿孔结构没有对基准桨的气动性能产生损失,可以在此基础上开展降噪设计。

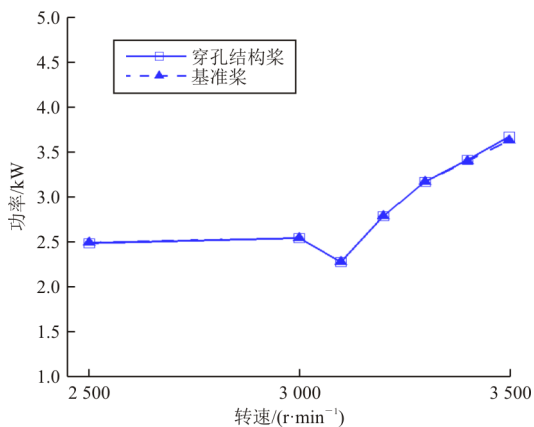


图7 功率试验结果

Fig. 7 Power data of test

噪声结果主要讨论指向角 $40^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内的频谱和指向性测试结果。本次试验测试了半消声

室的背景噪声,并与相同环境下的对转螺旋桨噪声进行对比,结果如图8所示,可以看出:对转螺旋桨的远场噪声幅值主要在2000 Hz以内,更高频段主要是宽频噪声,符合对转螺旋桨气动噪声的一般规律。背景噪声与对转螺旋桨噪声相差20 dB以上,满足试验要求,认为试验数据有效。

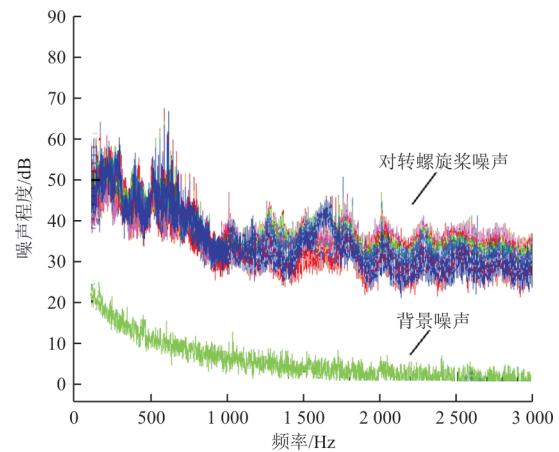


图8 噪声频谱结果

Fig. 8 Noise spectrum results

对转螺旋桨与单排螺旋桨相似,其通过频率(Blade Passing Frequency,简称BPF)可以通过公式(2)计算得出。

$$f = N \frac{nK}{60} \quad (2)$$

式中: $N$ 为通过频率的阶数,取正整数; $n$ 为转速; $K$ 为桨叶数量。

对转螺旋桨的噪声幅值主要分布在前两阶通过频率和干涉频率处。因为本次试验的两套对转螺旋桨前后排均为6片桨叶,干涉频率会和高阶通过频率重叠。基准桨和穿孔结构桨在3500 r/min时一阶通过频率(1BPF)处的远场指向性结果如图9所示。

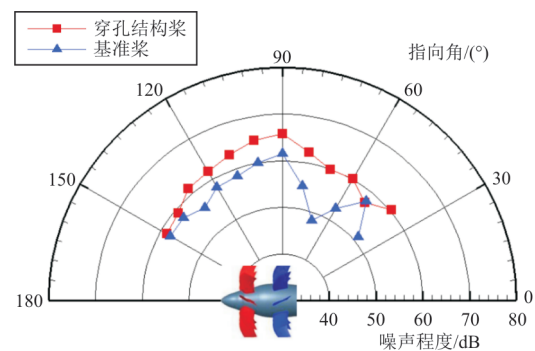


图9 1BPF处的噪声指向性

Fig. 9 Noise directivity at 1BPF

从图9可以看出:两套对转桨在 $90^\circ$ 指向角处的噪声声压级都是最大的,且噪声随着指向角从小到大呈现高一低一高一低的起伏趋势,符合对转螺旋桨远场噪声的基本规律。但是在所测指向角范围内,相比基准桨,带孔桨的噪声没有降低。

两套对转桨在 $3\ 500\ \text{r/min}$ 时,二阶通过频率(2BPF)或一阶干涉频率处的远场噪声测试结果如图10所示,可以看出:两套桨的远场噪声均在 $150^\circ$ 处最大, $70^\circ$ 和 $110^\circ$ 处最小。整体来看,各指向角的声压级分布比较均匀,没有出现明显的极大或极小值。从降噪效果来看, $40^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ 均有明显的降噪效果, $70^\circ$ 降噪效果达 $10\ \text{dB}$ ,最明显,对飞机舱内影响最大的 $90^\circ$ 处,降噪 $5\ \text{dB}$ 。

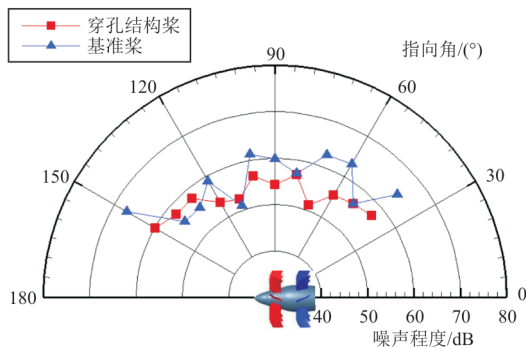


图10 2BPF处的噪声指向性  
Fig. 10 Noise directivity at 2BPF

整体来看,在所测指向角范围内,穿孔结构对转桨在2BPF处降噪效果明显,在1BPF处降噪效果不明显。这是因为穿孔结构位于后排桨叶的吸力面,穿孔结构吸收了前排桨叶的尾涡,降低了前排尾涡直接冲击后排桨叶的强度,平衡了后排桨叶前缘的压力峰值,从而降低了后排桨叶与前排桨叶之间的气流干涉以及二阶通过频率处的噪声。

为了降低对转螺旋桨的干涉噪声,可以通过降低后排桨叶的压力峰值来实现,具体措施可以是桨叶穿孔结构,也可以将后排桨叶适当后掠,延长前排尾涡的到达时间,使尾涡自然减弱。上述思路可以为对转螺旋桨的降噪设计提供参考。

### 3 结论

1) 本文设计了适用于地面声学环境的对转螺旋桨试验系统,该系统能够针对地面开车状态,开展对转螺旋桨的气动噪声试验。

2) 通过两套对转螺旋桨的气动噪声试验,对比研究了两套桨的气动性能和远场噪声特性,试

验结果表明穿孔结构可以在不损失气动性能的前提下,降低二阶通过频率处的噪声。

3) 可以通过降低后排桨叶表面压力峰值的思路来设计低噪声对转螺旋桨。但是,如何同时降低一阶通过频率处的噪声,还需要进一步研究。

### 参考文献

- [1] HAGER R, VRABEL D. Advanced turboprop project: NASA-SP-495[R]. US: NASA, 1988.
- [2] 周莉, 是介, 王占学. 开式转子发动机研究进展[J]. 推进技术, 2019, 40(9): 1921-1932.  
ZHOU Li, SHI Jie, WANG Zhanxue. Research progress in open-rotor engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(9): 1921-1932. (in Chinese)
- [3] 陈博, 贺象. 国外桨扇技术发展概况[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(1): 54-58.  
CHEN Bo, HE Xiang. Development of the propfan technology abroad [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(1): 54-58. (in Chinese)
- [4] KINGAN M J, PARRY A B. Acoustic theory of the many bladed contra-rotating propeller: the effects of sweep on noise enhancement and reduction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 468: 89-115.
- [5] PARRY A B, KINGAN M J. Acoustic theory of the many bladed contra-rotating propeller: physics of the wake interaction noise critical sources [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 88: 1-12.
- [6] 孙召政, 闫文辉, 曹德松. 后桨距角对某共轴对转螺旋桨性能影响规律研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 37-44.  
SUN Zhaozheng, YAN Wenhui, CAO Desong. Effect of aft propeller pitch angle on the performance of contra rotation propeller [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 37-44. (in Chinese)
- [7] 金海波, 陈宣亮, 覃湘桂. 基于Mohring声类比的开式转子发动机噪声分析[J]. 航空动力学报, 2018, 33(4): 785-791.  
JIN Haibo, CHEN Xuanliang, TAN Xianggui. Open-rotor engine noise analysis based on mohring acoustic analogy [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(4): 785-791. (in Chinese)
- [8] SCHNELL R, YIN J, FUNKE S, et al. Aerodynamic and basic acoustic optimization of a contra-rotating open rotor with experimental verification [C] // 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Colorado: AIAA, 2012: 1-9.
- [9] WILLIAMS J E F, KINGS D LHAW. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1969, 264: 321-342.
- [10] PARRYA B. Relative importance of open rotor tone and broadband noise sources [C] // Proceedings of 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Portland, OR: AIAA, 2011: 1075-1087.
- [11] HOFF G E. Experimental performance and acoustic investigation of modern, counterrotating lade concepts: NASA-CR-182158[R]. US: NASA, 1990.
- [12] ELLIOTT D M. Initial investigation of the acoustics of a counter rotating open rotor model with historic baseline blades in a low speed wind tunnel: AIAA-2011-2760[R].

- US: AIAA, 2011.
- [13] DALE E, VAN Z. The NASA environmentally responsible aviation project/general electric open rotor test campaign: AIAA-2013-0415[R]. US: AIAA, 2013.
- [14] 陈正武, 姜裕标, 赵昱, 等. 对转螺旋桨气动和气动噪声风洞试验技术[J]. 航空动力学报, 2024, 39(5): 203-212. CHEN Zhengwu, JIANG Yubiao, ZHAO Yu, et al. The counter-rotating propellers aerodynamic and aerodynamic noise test technology in wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(5): 203-212. (in Chinese)
- [15] 崔盼望, 全帆, 冯和英, 等. 后排转子直径对对转螺旋桨气动和声学特性的影响[J]. 航空动力学报, 2022, 37(8): 1749-1760. CUI Panwang, TONG Fan, FENG Heying, et al. Influence of rear rotor diameter on aerodynamic and acoustic characteristics of counter-rotating propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(8): 1749-1760. (in Chinese)
- [16] 卫凯, 曹琦, 燕群, 等. 开式转子噪声数值模拟与试验研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(3): 476-481. WEI Kai, CAO Qi, YAN Qun, et al. Numerical simulation and experimental measurement of open-rotor[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(3): 476-481. (in Chinese)
- [17] 卫凯, 曹琦, 燕群, 等. 地面声学环境下的无人机螺旋桨气动噪声试验[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 417-423. WEI Kai, CAO Qi, YAN Qun, et al. Aerodynamic noise test of propeller of unmanned aerial vehicle [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 417-423. (in Chinese)
- [18] 孙爽, 乔渭阳, 武兆伟, 等. 基于传声器阵列技术的发动机地面开车声学特性实验研究[J]. 振动工程学报, 2008(21): 138-141. SUN Shuang, QIAO Weiyang, WU Zhaowei, et al. Theoretical design and experimental analysis of microphone perforated absorber for aircraft APU exhaust noise[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008(21): 138-141. (in Chinese)
- [19] 张元周. 某型发动机静态远场噪声测试及初步分析[J]. 航空发动机, 1994(4): 40-47. ZHANG Yuanzhou. Static far field noise testing and preliminary analysis of a certain engine[J]. Aeroengine, 1994(4): 40-47. (in Chinese)
- [20] 乔渭阳, 王良锋, 段文华, 等. 航空发动机气动声学设计的理论、模型和方法[J]. 推进技术, 2021, 42(1): 10-38. QIAO Weiyang, WANG Liangfeng, DUAN Wenhua, et al. Theory, model and method of aero-engine aeroacoustic design [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(1): 10-38. (in Chinese)
- [21] 贺象, 赵振国, 舒太波, 等. 桨扇后掠降噪规律及声学机理数值研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(4): 1-10. HE Xiang, ZHAO Zhenguo, SHU Taibo, et al. Numerical investigation of the noise reduction law and acoustic mechanism of the sweepback propfan [J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(4): 1-10. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)

(上接第 147 页)

- [13] PRATAPA P P, SURYANARAYANA P, PAULINO H G. Bloch wave framework for structures with nonlocal interactions: application to the design of origami acoustic metamaterials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2018, 118: 115-132.
- [14] 邵长林, 王建兵. 褶皱芯材结构隔声特性的实验研究[J]. 山东建材学院学报, 1999(4): 18-20. SHAO Changlin, WANG Jianbing. Experimental research of folder-filler structure's soundproof characteristic[J]. Journal of Shandong Institute of Building Materials, 1999(4): 18-20. (in Chinese)
- [15] 王志瑾, 徐庆华. V-型褶皱夹芯板与隔声性能实验[J]. 振动工程学报, 2006, 19(1): 65-69. WANG Zhijin, XU Qinghua. Experimental research on soundproof characteristic for the sandwich plates with folded core [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(1): 65-69. (in Chinese)
- [16] 顾志武. 褶皱芯材和蜂窝芯材夹层板隔声性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007. GU Zhiwu. Research on the soundproof of the folder-filler core and honeycomb core sandwich panel [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [17] 袁新浩. 褶皱芯材夹层结构的隔声设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009. YUAN Xinhao. Design on soundproof characteristic of sandwich plates with folded core[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [18] 周华志, 王志瑾. M-型褶皱芯材夹层板吸能性能研究[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 579-587. ZHOU Huazhi, WANG Zhijin. Analysis of energy absorption capability of M-type folded core sandwich structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 579-587. (in Chinese)
- [19] WANG Z, ZHOU H, KHALIULIN V, et al. Six-ray folded configuration-s as the geometric basis of thin-walled elements in engineering structures [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130: 435-448.
- [20] CUI Z, WANG Z, CAO F. Research on mechanical properties of V-type folded core sandwich structures [J]. Aerospace, 2022, 9(8): 398-405.
- [21] TANG Y, LI F, XIN F, et al. Heterogeneously perforated honeycomb-corrugation hybrid sandwich panel as sound absorber[J]. Materials & Design, 2017, 134: 502-512.
- [21] 李志宽, 吴锦武, 田文昊, 等. 基于夹层板理论的圆形孔蜂窝结构隔声量研究[J]. 声学技术, 2019, 38(2): 194-199. LI Zhikuan, WU Jinwu, TIAN Wenhao, et al. Study of the sound insulation of circular honeycomb structure based on sandwich plate theory [J]. Technical Acoustics, 2019, 38(2): 194-199. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国建设部. 建筑隔声评价标准: GB/T 50121-2005[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2005. Ministry of Construction of the People's Republic of China. Rating standard of sound insulation in buildings: GB/T 50121-2005 [S]. Beijing: Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2005. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)