http://myfj.cnjournals.com myfj_sadri@comac.cc (021)20866796

DOI: 10. 19416/j. cnki. 1674 – 9804. 2022. 01. 009

基于 BWI 辐射效率的低气动噪声共轴 对转螺旋桨的设计研究

吕昌昊 胡天翔 孙 韬 刘沛清*

(北京航空航天大学陆士嘉实验室(航空气动声学工业和信息化部重点实验室),北京100191)

摘 要:将共轴对转螺旋桨气动噪声快速预测理论与气动载荷快速预测方法相结合,对共轴对转螺旋桨远场气动噪声进行预测。分析了 BWI 辐射效率对共轴对转螺旋桨 BWI 干扰噪声的主控影响。对从低至高的(单排 6-12)前后等桨叶数对转桨进行了研究。结果表明虽然低桨叶数与高桨叶数对转桨的气动噪声特性不同,但是总体上前后指向性的高声压区仍然是由 BWI 噪声控制。同时等桨叶数的设计只是使高声压区更集中,却无法对其进行降低。随后,对比了不同桨叶数共轴对转螺旋桨远场气动噪声的表现,认为不等桨叶数对转桨气动噪声普遍优于等桨叶数情况。得出了总桨叶数相同情况下对转桨前后 桨叶数的搭配方案。对近场噪声高精预测方法将在未来的研究中对辐射效率的具体机理进行研究。

关键词: 共轴对转螺旋桨;尾迹对桨叶(BWI)的干扰噪声;辐射效率;快速预测方法 中图分类号: V211.7 **文献标识码:** A OSID: DEALS

0 引言

早在上世纪 80 年代,共轴对转螺旋桨就以其 潜在的高气动效率引起科学界的关注^[14]。但是由 于巨大的气动噪声,最终淡出了人们的视野。目前 已知的共轴对转螺旋桨飞机也仅有苏联的图 95 以 及乌克兰的安 70,如图 1 所示。但是过去 20 年内由



(a) 图-95 远程轰炸机



(b) 安-70 军用运输机图 1 共轴对转螺旋桨飞机

于燃料价格上升及航空需求的增加,共轴对转螺旋 桨高气动效率以及最大起飞重量大等优势再次被人 们关注。同时,气动噪声学科的发展使得降低其噪 声成为可能。目前,欧盟已将其列为新一代发动机 的备选构型进行研究^[5]。

基金项目: 国家自然科学基金(12072016, 11772033, 1217021666 和 11721202)

- * 通信作者. E-mail: lpq@ buaa. edu. cn
- **引用格式:** 吕昌昊, 胡天翔, 孙韬, 等. 基于 BWI 辐射效率的低气动噪声共轴对转螺旋桨的设计研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(1):83-89. LYU C H, HU T X, SUN T, et al. Low noise counter rotating propellers design based on BWI radiation efficiency[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022(1):83-89(in Chinese).

另一方面,近年来随着环境意识增强,噪声早已 被列入环境污染的一种。ICAO 早已提出了逐步完 善的飞机噪声标准^[6]。因此,近10 年来对于对转螺 旋桨的主要研究集中在气动噪声领域。主要包括用 于初设阶段的气动、噪声快速预测方法,通过高精度 噪声预测方法及实验方法对远场噪声机理进行研究 以及降噪技术的研究。

螺旋桨噪声按照声源可以分为厚度噪声、载荷 噪声以及宽频噪声。厚度噪声是由于叶片厚度周期 性的排开空气产生的噪声。载荷噪声则是由于叶片 上的压强分布反向作用于空气上产生的。一切随机 发生的涡脱落及湍流尾迹脱落均导致宽频噪声,并 且厚度噪声与周期性的载荷噪声统称为离散噪声。 与单桨不同,共轴对转螺旋桨的离散噪声分为单螺 旋桨噪声的独立噪声和前后桨的干扰噪声两部分。 对转螺旋桨离散噪声主要噪声源按照产生机理分 类,如图2所示。首先,对转桨的干扰噪声是要远超 独立噪声的。而对转桨的干扰噪声又可以分为前后 桨的势流干扰产生的噪声以及前桨尾迹(BWI)及桨 尖涡撞击后桨(BVI)产生的干扰噪声。已有研究证 实了桨间的势流干扰噪声远低于黏性尾流撞击后桨 产生的噪声^[7]。



图 2 对转螺旋桨噪声

随后,Horváth^[8]进一步通过实验验证了该观点 并且列举出角模态(1n₁B₁ - n₂B₂1)相关矩阵,如图 3 所示。图中横坐标与纵坐标分别为前桨和后桨在 干涉频率中占的阶数,如1BPF1 + 1BPF2。Horváth 根据辐射效率随角模态增加而减小的特性,推断干 扰噪声也应有类似表现,即认为辐射效率在远场噪 声中的主控性。从角模态矩阵可以看出,根据该理 论的话对角线上的噪声应该较大,远离对角线时噪 声衰减迅速。

前菜類率 時模态 后菜類率	OF	F	2F	3F	4F	5F
0A	-	12	24	36	48	60
A	10	2	14	26	38	50
2A	20	8	4	16	28	40
3A	30	18	6	6	18	30
4A	40	28	16	4	8	20
5A	50	38	26	14	2	10

图 3 对转桨角模态矩阵

基于该推论及假设,HORVÁTH^[9]又于 2019 年提出了基于噪声辐射效率降低对转桨干扰噪声 的策略。HORVÁTH 认为既然对角线上的角模态 总是比较小,干脆"放弃"它们转而使远离对角线 的角模态以更快的速度增加从而以更大的衰减速 度衰减。表1和表2对比了12×10与12×12对 转桨的角模态分布,可见相对于12×10来说12× 12的对转桨对角线左侧角模态都有所增大,对应 的干扰噪声也会降低。对于对角线对应的干扰噪 声,角模态均为0的意思是轴向辐射效率最大。 因此其干扰噪声更多的向对转桨前后辐射,更加 集中,在应用其它降噪技术的时候也就更容易针 对性控制。

表 1 12×10 对转桨角模态矩阵

BPF ₂			BPF_1		
	0	1	2	3	4
0	12	24	36	48	
1	10	2	14	26	38
2BPF ₂	20	8	4	16	28
3BPF ₂	30	18	6	6	18
$4BPF_2$	40	28	16	4	8

2022 年第1期

= 2

<i>我 2 12 × 12 对将</i> 未用快心定件					
DDF			BPF_1		
DI F ₂	0	1	2	3	4
0	12	24	36	48	
1	12	0	12	24	36
$2BPF_2$	24	12	0	12	24
3BPF ₂	36	24	12	0	12
$4BPF_2$	48	36	24	12	0

然而从角模态及辐射效率的角度考虑,不等桨 叶数对转桨也可以成为很好的选择。本文通过对转 桨 BWI 及独立噪声快速预测方法,对从低至高的 (单排 6-12)前后等桨叶数对转桨进行了研究。结 果表明虽然低桨叶数与高桨叶数对转桨的气动噪声 特性不同,但是总体上前后指向性的高声压区仍然 是由 BWI 噪声控制。同时等桨叶数的设计只是使 高声压区更集中,却无法对其进行降低。随后,对比 了不同桨叶数共轴对转螺旋桨远场气动噪声的表 现,认为不等桨叶数对转桨气动噪声普遍优于等桨 叶数情况。

1 方法与构型

1.1 对转桨尾迹干扰噪声频域预测方法

在单桨频域噪声预测中^[10-12],声压可以表示为:

$$p = \frac{-\rho c_0^2 DB}{8\pi r_0 (1 - M_x \cos\theta)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{imB\Omega}{(1 - M_x \cos\theta)} \left(t - \frac{r_0}{c_0}\right) - imB\left(\frac{\pi}{2} - \psi_0\right)\right] P_m$$
(1)

这里 P_m 可以表示为:

$$P_m = \int_{z_0}^{1} S(z) J_{mB} \left[\frac{m B M_i z \sin \theta}{(1 - M_x \cos \theta)} \right] dz \qquad (2)$$

其中,S(z)代表沿着桨叶径向的声源强度。 $J_{mB}\left[\frac{mBM_{z}\sin\theta}{(1-M_{x}\cos\theta)}\right]$ 是贝塞尔函数,它就代表了转子 噪声向远场辐射的辐射效率。

对于对转桨,同样有类似的参量定义^[13-14]。方程(3)和方程(4)分别为对转桨前、后桨干扰噪声公式,其中 n_F 及 n_A 为干扰噪声的谐波分量。

$$p = \frac{i\rho c_0^2 DB_1}{8\pi r_0 (1 - M_x \cos\theta)} \sum_{m = -\infty}^{\infty} \sum_{n = -\infty}^{\infty}$$

$$\exp\left[\frac{i(n_{F}B_{1}\Omega_{1} + n_{A}B_{2}\Omega V_{2})}{(1 - M_{x}\cos\theta)}\left(\frac{r_{0}}{c_{0}}\right) + i(n_{F}B_{1} - n_{A}B_{2})\left(\frac{\pi}{2} + \psi_{0}\right)\right]P_{1n_{F}n_{A}} \quad (3)$$

$$p = \frac{i\rho c_0^2 B_2}{8\pi r_0 (1 - M_x \cos\theta)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{i(n_F B_1 \Omega_1 + n_A B_2 \Omega V_2)}{(1 - M_x \cos\theta)} \left(\frac{r_0}{c_0}\right) + i(n_F B_1 - n_A B_2) \left(\frac{\pi}{2} + \psi_0\right)\right] P_{2n_F n_A} \quad (4)$$

将 $P_{n_{pn_{A}}}$ 中辐射效率以外的项均当作前、后桨径向 分布的源强项 $S_{1}(z)$ 及 $S_{2}(z)$,则 P_{1nm} ,及 P_{2nm} ,如下:

$$P_{1n_{F}n_{A}} = \int_{Z_{0}}^{1} S_{1}(z) J_{n_{F}B_{1}-n_{A}B_{2}} \Big[\frac{(n_{F}B_{1}M_{t_{1}} + n_{A}B_{2}M_{t_{2}})}{(1 - M_{x}\cos\theta)} z\sin\theta \Big] dz$$
(5)

$$P_{2n_{F}n_{A}} = \int_{Z_{0}}^{1} S_{2}(z) J_{n_{F}B_{1}-n_{A}B_{2}} \Big[\frac{(n_{F}B_{1}M_{t_{1}} + n_{A}B_{2}M_{t_{2}})}{(1 - M_{x}\cos\theta)} z\sin\theta \Big] dz$$
(6)

同样的,贝塞尔函数部分代表了对转桨前、后桨 发出的干扰噪声的远场辐射效率,这里前后桨具有 相同的辐射效率J_{nph1-nAB2}。上述公式在使用时需要 提供桨叶径向的源强项,这通常通过 CFD 计算或片 条理论完成。本文采用共轴对转螺旋桨片条理论对 桨上叶素气动力进行计算。

1.2 对转桨研究工况

本文使用的对转桨为某型6×6共轴对转螺旋桨,前后桨转速均为1075 rpm。同时,前后桨直径为3.95 m,其几何布局如图4所示。



图 4 共轴对转螺旋桨三维视图

对转桨噪声的研究应在保证其气动表现基本不 变的情况下进行,这可以通过调整包括弦长、扭角及 翼型等桨叶参数完成。本文研究使用调整安装角来 调整整体扭角的方式对气动表现进行调整。研究的 基准工况为6×6,前后桨安装角均为34°。其起飞 气动力表现为:T = 43.0 KN, P = 3 933.6 KW。 在等桨叶数研究中,对6×6、8×8、10×10、12×12 在 前后安装角一致的情况下进行调整,气动力与安装角 见表3。这里由于基准构型为6×6,无法简单的通过 调整安装角的方式得到气动表现比较接近的4×4 构 型,因此未对其进行研究。同时12×12 桨在 31°以下 气动力计算发散,因此取31.1°作为研究对象。

桨叶搭配	I1 = I2	T/KN	P/KW
6 × 6	34	43.0	3 933.6
8 × 8	32.4	43.4	3 917.9
10×10	31.5	43.0	3 926.5
12 × 12	31.1	43.9	4 067.8

为了研究不等桨叶数对 BWI 的影响,同样需 要通过调整安装角使各自的气动力表现与原等桨 叶桨一致。在桨叶总数为12 的情况下,不同前后 桨桨叶数搭配的对转桨桨叶安装角及气动力表现 见表4。

表 4	个寺朵叶敛灯转朵安装用与气切表现

桨叶搭配	$I_1 = I_2$	T/kN	P/kW
6 × 6	34	43.0	3 933.6
5 × 7	34	42.8	3 918.6
4×8	34.2	42.7	3 937.0
3 × 9	34.6	42.6	3 983.3
7×5	34.3	42.7	3 928.0
8 × 4	34.5	42.0	3 935.8
9 × 3	35	41.1	3 963.5

2 结果与讨论

2.1 诱导角修正

上述对转桨 BWI 干扰噪声公式由 Parry 于 2019 年推导得出。但是在其推导过程并未考虑前桨尾迹 由于诱导产生的诱导角度,如图 5 所示。



(b) 对转桨叶素三角形图 5 无诱导角的 BWI 噪声模型

真实对转桨前桨实际入流角受到前桨自身以及 后桨对前桨的诱导作用,如图 6(a)所示。为此,需 要在噪声计算公式中加入由片条理论计算得出的前



(a) 带诱导角修正的对转桨叶素三角形



桨诱导角度进行修正。图 6(b) 为考虑诱导角的 BWI 声压与未考虑诱导角的 BWI 的对比,可见诱导 角对声压影响较大,不应该被忽略。

2.2 等桨叶数气动噪声表现

噪声预测中,远场麦克风取在半径为10m,间隔 2°的半圆上。不同桨叶数的等桨叶数对转桨远场噪声 指向性如图7所示,其中OASPL取至3阶干扰谐波。

首先,单桨独立噪声随桨叶数增加下降很明显, 因此桨平面附近 OASPL 随桨叶数增加而减小。但 是桨叶数越大,前后指向性的干扰噪声就越大。这 是由于桨叶数相等时1 阶谐波 BWI 的角模态为0,









图 7 等桨叶数对转桨各阶谐波指向性

此时 BWI 干扰噪声辐射效率为1,噪声主要指向前 后方向。这也从辐射效率的角度说明了等桨叶数的 设计只能使远场噪声指向性更加集中,而不能从根 本上减弱它们。

2.3 不等桨叶数气动噪声表现

图 8 为桨叶总数为 12 的情况下,不同前后桨桨 叶数搭配的对转桨远场 OASPL 指向性。首先可以 看到,前后桨叶数对称的构型 OASPL 虽然并不完全 一致,但是整个指向性曲线平均来看最大声压差别 不大。这说明对于前后桨叶数对称的对转桨,其 BWI 差别不大。同时可以看到,5 × 7 搭配的 BWI 最低,而4×8 搭配的 BWI 甚至要高于等桨叶数情 况。这说明不等桨叶数搭配并不一定绝对导致噪声 的降低。至于5×7 搭配噪声较低原因会在下文 解释。



图9为5×7构型各阶谐波与6×6构型各阶谐 波声压对比。可以看到5×7在3阶干扰谐波以内 并未出现如同6×6类似的前后非常高的干扰噪声, 这是由于该类干扰噪声是由于对应频率的角模态为 0导致辐射效率为1而引起的。对于5×7构型,其 角模态为0的干扰频率最早出现也要在7BPF₁+ 5BPF₂时才会出现。图中特意对直到7阶干扰噪声 的OASPL进行了计算,结果证实对于5×7构型即 使包含了角模态为0的干扰噪声,其总声压级也不 会显著提高。这是由于7阶干扰噪声自身随谐波的 衰减导致的。同时,7BPF₁+5BPF₂仍然处在高水平 也从侧面证实了辐射效率对远场噪声主控地位。



图 9 5×7 对转桨各阶谐波指向性

3 结论

本文首先介绍了对转桨噪声的类别。随后从对 转桨 BWI 频域快速预测方法出发,引入了诱导角对 该公式的影响。并对比了有无诱导角时对转桨声压 指向性的差别。

前后等桨叶数情况下,对转桨离散噪声的 OAS-PL 随桨叶数有不同特性。桨叶数很大时,BWI 干扰 噪声对 OASPL 起主要贡献。随着桨叶数的降低,独 立噪声对旋转平面中部指向性贡献增大,主控该区 域 OASPL。

辐射效率对共轴对转螺旋桨的 BWI 起着绝对 的主控作用。前后桨叶数相反 6×8、8×6 的构型, OASPL 相差不大。从桨叶数的角度考虑,对转桨应 该尽量去选择前后桨叶数能满足角模态为0 的干扰 噪声出现在更高的阶数这一条件。后续研究将集中 在通过高精 CFD 与 FWH 相结合的混合算法对对转 桨桨叶数对对转桨的气动及噪声的影响进行更深入 的研究。

参考文献:

- [1] DAVIDSON, ROBERT E. Optimization and performance calculation of du al-rotation propellers, 1981.
- [2] STRACK W C, KNIP G, WEISBRICH A L, et al. Technology and benefits of aircraft counter rotation propellers [J]. Aircraft components, 1981.
- [3] DAVENPORT F, COLEHOUR J, SOKHEY J. Analysis of counter-rotating propeller performance: 23rd Aerospace Sciences Meeting[C]. USA: AIAA, 1985.
- [4] PLAYLE, S C, KORKAN K D LAVANTE E V A numerical method for the design and analysis of counter-rotating propellers [J]. Journal of Propulsion and Power, 1986,2(1):57-63.
- [5] KNÖRZER D, SZODRUCH J. Validation of radical engine architecture sys tems: the "DREAM" research project:Innovation for Sustainable Aviation in a Global Environment[C]. Proceedings of the Sixth European Aeronautics Days, Madrid, 2012.
- [6] DICKSON N. ICAO noise standards; ICAO Symposium on Aviation and Climate Change [C]. [S. l.]; ICAO 2013.
- [7] DELATTRE G, FALISSARD F. Influence of torque ration on counter-rotating open-rotor interaction noise [J].
 AIAA Journal, 2015, 53(9): 2726-2738.
- [8] HORVÁTH C. Beamforming investigation of dominant counter-rotating open rotor tonal and broadband noise sources[J]. AIAA Journal, 2015, 53(6): 1602-1611.
- [9] HORVÁTH C, FENYVESI B, Kocsis B, et al. Towards counter-rotating open rotor noise reduction via radiation efficiency considerations [C]// AIAA Aeroacoustics 2019 Conference. 2019.
- [10] HANSON D B. Helicoidal surface theory for harmonic noise of propellers in the far field [J]. AIAA Journal, 1980, 18(10): 1213-1220.
- [11] PARRY A B, CRIGHTON D G. Errata: asymptotic theory of propeller noise-part I: subsonic single-rotation propeller[J]. AIAA Journal, 1989, 27 (9): 1184-1190.
- [12] CRIGHTON D G, PARRY A B. Asymptotic theory of propeller noise. II-Supersonic single-rotation propeller
 [J]. AIAA Journal, 1991, 29(12): 2031-2037.
- [13] KINGAN M J, PARRY A B. Acoustic theory of the many-bladed con tra-rotating propeller: analysis of the effects of blade sweep on wake interaction noise [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 868: 385-427.
- [14] KINGAN M J, PARRY A B. Acoustic theory of the

many-bladed con tra-rotating propeller: the effects of sweep on noise enhancement and reduction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 468: 115089.

作者简介

吕昌昊 男,博士。主要研究方向:螺旋桨气动噪声机理及 降噪研究。E-mail:by1705169@buaa.edu.cn
胡天翔 男,副教授,主要研究方向:非定常流动、螺旋桨
气动噪声机理及降噪研究等。E-mail:tianxiang_hu@buaa. edu. cn

孙 韬 男,硕士。主要研究方向:螺旋桨气动噪声机理及 降噪研究。E-mail:790873972@qq.com

刘沛清 男,教授,博士生导师。主要研究方向: 旋涡分离 流与流动控制、飞行器大迎角空气动力学、鸭式布局涡系干 扰与控制、高速层流控制技术、现代轻质高效螺旋桨设计与 优化、飞行器低 Re 数流动机理与控制、大型飞机起飞着落 气动性能、水上迫降性能、气动噪声研究等领域。E-mail: lpq@ buaa. edu. cn

Low noise counter rotating propellers design based on BWI radiation efficiency

LYU Changhao HU Tianxiang SUN Tao LIU Peiqing *

(Beihang University (Key Laboratory of Aeroacoustics of Ministry of Industry and Information Technology), Beijing 100191, China)

Abstract: In this paper, the far-field aerodynamic noise of coaxial counter rotating propeller was predicted by combining the rapid prediction theory of aerodynamic noise and the rapid prediction method of aerodynamic load. The influence of BWI radiation efficiency on the main control of BWI interference noise of coaxial counter rotating propeller was analyzed. The counter rotating propeller with equal number of front and rear blades from low to high (single row 6-12) was studied. The results show that although the aerodynamic noise characteristics are different between low blade number and high blade number, the high sound pressure region at front and behind region is still dominated by BWI noise. At the same time, the design of equal blades number only makes the high sound pressure region more concentrated, but it can not be reduced. It is considered that non-equal blade number CRPs have better acoustics performance than equal one after the comparison between several non-equal configurations. The matching scheme is obtained for the number of blades before and after CRPs with same total blade numbers. High accuracy method will be used to study the nearfield acoustic in the future to get more characteristic of radiation efficiency; fast prediction method

^{*} Corresponding author. E-mail: lpq@ buaa. edu. cn