

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220838-13

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220838

不同轴向间距对对转螺旋桨气动和声学特性的影响机理

冯和英^{1,2}, 崔盼望^{1,2}, 全帆², 陈正武², 李抢斌²

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

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: 基于非线性谐波法和声类比理论, 研究了转子轴向间距对对转螺旋桨气动特性和噪声的影响规律及其物理机制。以某型对转螺旋桨为研究对象, 研究了 6 种具有不同转子轴向间距的对转螺旋桨模型。计算结果表明: 对转螺旋桨转子轴向间距的变化对对转螺旋桨总效率有一定的影响, 对总拉力系数和总功率系数影响不大。转子轴向间距的增大, 对前后排转子之间的轴向速度有显著的影响, 对转子后气流轴向速度影响不大。随着转子轴向间距的增大, 前后排转子之间的径向速度逐渐减小, 进而减弱了对转螺旋桨转子间的滑流收缩。通过改变转子轴向间距, 相比最小轴向间距, 对转螺旋桨噪声最大降低约 10 dB, 干涉噪声降低约 10 dB 以上, 效率提升了 1.4%。随着转子轴向间距的增大, 前排转子 85% 叶高处的压力面和吸力面 1 阶谐波压力幅值在尾缘处分别降低 1 836 Pa(89%) 和 1 277 Pa(90%), 后排转子 75% 叶高处的压力面和吸力面 3 阶谐波压力幅值在前缘处分别降低 266 Pa(78%) 和 209 Pa(85%)。

关 键 词: 对转螺旋桨; 开式转子; 轴向间距; 非线性谐波法; 滑流流场; 气动干扰

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Influence mechanism of different axial spacings on aerodynamic and acoustic characteristics of counter-rotating propeller

FENG Heying^{1,2}, CUI Panwang^{1,2}, TONG Fan², CHEN Zhengwu², LI Qiangbin²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;

2. Key Laboratory of Aerodynamic Noise Control,

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

Abstract: Based on the nonlinear harmonic method and acoustic analogy theory, the influences of rotor axial spacing on the aerodynamic characteristics and noise of counter-rotating propeller and its physical mechanism were studied. Taking a certain type of counter-rotating propeller as the research object, six kinds of counter-rotating propeller models with different rotor axial spacings were studied. The calculation results showed that change of the axial spacing of the counter-rotating propeller rotor had a certain influence on the overall efficiency of the counter-rotating propeller, but had little influence on the total pull coefficient and total power coefficient. The increase of rotor axial spacing had a significant impact on the axial velocity between the front and rear rotors, but had little impact on the axial velocity of

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(51875194, 12102451); 湖南省自然科学基金(2022JJ30249); 湖南省教育厅优秀青年基金(20B226)

作者简介: 冯和英(1983—), 女, 教授, 博士, 主要从事气动声学研究。

通信作者: 全帆(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为叶轮机械气动声学、仿生降噪技术研究。E-mail: tongfan@cardc.cn

引用格式: 冯和英, 崔盼望, 全帆, 等. 不同轴向间距对对转螺旋桨气动和声学特性的影响机理[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220838.

FENG Heying, CUI Panwang, TONG Fan, et al. Influence mechanism of different axial spacings on aerodynamic and acoustic characteristics of counter-rotating propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220838.

air flow behind the rotor. With the increase of the axial distance between rotors, the radial velocity between the front and rear rotors decreased gradually, and then the slipstream contraction between rotors of counter-rotating propeller was weakened. By changing the axial spacing of the rotor, compared with the minimum axial spacing, the maximum noise of the counter-rotating propeller was reduced by about 10 dB, the interference noise was reduced by more than 10 dB, and the efficiency was increased by 1.4%. With the increase of rotor axial spacing, the amplitude of the first harmonic pressure on the pressure surface and suction surface at 85% of the blade height of the front rotor decreased by 1 836 Pa (89%) and 1 277 Pa (90%), respectively, at the trailing edge, and the amplitude of the third harmonic pressure on the pressure surface and suction surface at 75% of the blade height of the rear rotor decreased by 266 Pa (78%) and 209 Pa (85%), respectively, at the leading edge.

Keywords: counter-rotating propeller; open rotor; axial spacing; nonlinear harmonic method; slipstream flowfield; aerodynamic interactions

螺旋桨飞机具有起飞滑跑距离短、航程远、单位耗油率低等优点,在当前的航空推进技术发展具有重要的地位^[1]。比如在军用运输、民用支线客运、分布式航空推进等方面都得到了普遍的应用^[2]。近年来,随着燃油价格的不断上涨以及对环境保护与节能减排的重视,高效率、高功率、低噪声和低污染排放物的对转螺旋桨发动机(又被称为开式转子发动机),又重新引起了人们的广泛关注和研究^[3-5]。

对转螺旋桨发动机虽然具有非常显著的经济性优势以及较高的巡航速度,但是,强烈的噪声问题是限制其发展并投入使用的关键技术瓶颈^[6]。对转螺旋桨发动机的一个显著特点是其包含前后两排高速对转的螺旋桨,前后两排螺旋桨间存在桨尖涡干扰、黏性尾迹干扰、势流场干扰等许多复杂的干扰,因而噪声源复杂^[7]。对转螺旋桨噪声除了包含厚度噪声、定常载荷噪声,还包含黏性尾迹干涉噪声、叶尖涡干涉噪声、势流场干扰噪声等非定常载荷噪声,此外,还有非线性四极子噪声和宽频噪声等。其中前排转子产生的三维复杂桨尖涡与后排转子干涉是关键噪声源之一^[8-9]。国内外学者针对对转螺旋桨气动性能及噪声开展了大量的试验和数值模拟研究。

早在 1948 年,美国兰利航空实验室对对转螺旋桨噪声开展了试验研究^[10]。20 世纪 70~90 年代, NASA 开展了先进桨扇计划,对高速螺旋桨进行了风洞试验和飞行试验研究,结果表明,高速螺旋桨在较高的飞行马赫数下($Ma=0.7\sim 0.8$)仍具有较高的推进效率^[11]。在噪声方面, NASA、GE 等也通过风洞试验研究了转速、叶片数目、叶片载荷、转子轴向间距等对对转螺旋桨噪声的影

响,并获得了宝贵的噪声影响规律^[12]。美国国家宇航局刘易斯研究中心对不同的叶片进行了风洞试验研究,研究表明后排转子裁剪、增加转子轴向间距等方法可以降低对转螺旋桨噪声^[13-14]。Spalart、Smith、Stuermer 等^[15-17]数值模拟研究了对转螺旋桨气动性能和噪声产生机理,并研究了不同叶片数、安装效应和不同前后排转子轴向间距等多种因素对对转螺旋桨流场/声场以及噪声产生机理的影响规律。

国内史文博、夏贞锋等^[18-19]利用非定常雷诺平均数值模拟方法和动态面搭接网格技术,研究了前后排转子之间的相互气动干扰,研究表明前后排转子之间复杂的流场结构是导致对转螺旋桨气动干扰的直接原因。袁培博^[20]和蔡明轩^[21]基于非线性谐波(nonlinear harmonic method, NLH 法)数值模拟研究了前后排转子轴向间距的变化对前后两排转子之间的相互气动干扰,计算结果显示,前后排转子轴向间距的变化直接会影响转子之间的流场和前后排转子气动干扰。目前,国内主要在研究对转螺旋桨气动性能的影响规律,而关于噪声方面的研究相对较少。部分学者和研究机构对螺旋桨和桨扇的噪声特性进行了一定的理论研究,如北京航空航天大学的孙晓峰、李晓东等^[22-23]和刘沛清^[1]以及中航工业的严成忠^[24]。金海波等基于计算流体力学(CFD)和计算声学(CAA)相结合的方法,对对转螺旋桨气动噪声做了数值预测。中国空气动力研究与发展中心则在 $5.5\text{ m}\times 4\text{ m}$ 航空声学风洞中开展了对转螺旋桨试验,研究了对转螺旋桨的气动特性和噪声特性^[25-26]。

目前,国内对于航空对转螺旋桨的研究内容大部分聚焦在对转螺旋桨众多设计参数(桨叶角、

前后排桨叶间距、桨叶数目)对其气动性能的影响,而对于对转螺旋桨噪声和噪声产生机理分析研究较少。为研究前后排转子轴向间距对对转螺旋桨气动性能和噪声的影响规律以及噪声产生机理,本文以某型对转螺旋桨为研究对象,数值模拟研究 6 种具有不同转子轴向间距的对转螺旋桨,具体研究了转子轴向间距的变化对对转螺旋桨气动性能和气动噪声的影响规律及其物理机理。

1 计算方法与几何模型

1.1 计算方法

本文采用 NLH 法对对转螺旋桨流场进行求解^[27-30],该方法具有较高的数值精度和计算效率,相比于 URANS(unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes)方法能够大大降低计算时间,主要应用于旋转机械计算。NLH 法是将守恒型变量 $\mathbf{U}$ 分解为时均值 $\bar{\mathbf{U}}$ 和周期性扰动 $\mathbf{U}'$ 的和,在频域内对时均值和周期性扰动进行求解。 $\mathbf{U} = (\rho, \rho \mathbf{v}, \rho E)$ 是守恒型变量, ρ 为密度, E 为总能, $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ 为相对速度。周期性扰动 $\mathbf{U}'$ 又分解为 N 阶谐波,与文献^[31]中的方法相同:

$$\mathbf{U}(\mathbf{x}, t) = \bar{\mathbf{U}}(\mathbf{x}) + \sum \mathbf{U}'(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

$$\mathbf{U}'(\mathbf{x}, t) = \sum_{k=1}^N [\tilde{\mathbf{U}}_k(\mathbf{x}) e^{i\omega_k t} + \tilde{\mathbf{U}}_{-k}(\mathbf{x}) e^{i\omega_{-k} t}] \quad (2)$$

式中 i 为虚数, ω_k 和 ω_{-k} 为第 k 阶谐波的频率。

获得流场和声源信息后,采用 FW-H(Ffowcs Williams-Hawkings)方程对对转螺旋桨噪声进行计算。本文在计算对转螺旋桨噪声时,以固壁面为积分面,忽略四极子噪声源,因为四极子噪声源在马赫数不高的情况下,其重要性不是很高^[31-33]。

采用无量纲参数分析对转螺旋桨气动性能时,对转螺旋桨的前进比 λ 、拉力系数 C_T 、功率系数 C_P 和推进效率 η 表示如下:

$$\lambda = \frac{V_\infty}{n_s D} \quad (3)$$

$$C_T = \frac{T}{\rho n_s^2 D^4} \quad (4)$$

$$C_P = \frac{2\pi n_s M}{\rho n_s^3 D^5} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{C_T}{C_P} \lambda \quad (6)$$

式中 V_∞ 为来流速度(m/s); n_s 为螺旋桨转速(r/s); D 为螺旋桨桨盘直径(m); T 为螺旋桨产生的拉力(N); ρ 为空气密度(kg/m^3); M 为扭矩($\text{N}\cdot\text{m}$); η 为推进效率。

1.2 几何模型及边界条件

对转螺旋桨前后排转子的几何参数如表 1 所示。

表 1 对转螺旋桨几何参数

Table 1 Geometric parameters of counter-rotating propeller

参数	前排转子	后排转子
叶片数	6	6
转速/(r/s)	107.5	-107.5
直径 D/m	0.658	0.658

前排转子和后排转子的桨叶角均为 30° ,对于基准对转螺旋桨,前后排转子轴向间距(S)为前排转子叶根弦长(c)的 2.6 倍,几何结构布局如图 1 所示。转子轴向间距指前排转子尾缘与后排转子的前缘之间的距离,图 2 是转子轴向间距示意图。

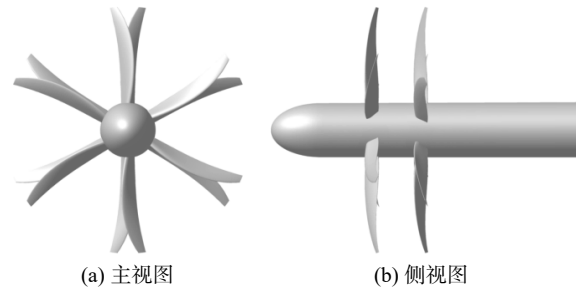


图 1 对转螺旋桨的几何布局

Fig. 1 Geometric layout of counter-rotating propeller

为了研究前后排转子轴向间距变化对对转螺旋桨气动和声学特性的影响,本文固定前排转子的位置,通过整体调整后排转子的轴向位置达到改变转子轴向间距的效果,来研究转子轴向间距变化对对转螺旋桨的影响。转子轴向间距 S 分别为前排转子叶根弦长 c 的 1.5 倍、2.0 倍、2.6 倍、3.0 倍、3.5 倍、4.0 倍,选取了以上 6 组转子轴向间距不同的对转螺旋桨模型进行数值模拟研究。几何模型如图 3 所示。

边界条件设置如下:来流速度 $V_\infty=60$ m/s,来流攻角为 0° ,远场大气压和静温分别为 97 kPa、293 K,对转螺旋桨前后排转子转速相同,均为 6 450 r/min。从上游向下游看,前排转子顺时针旋转,后排转子逆时针旋转。



图 2 转子轴向间距示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotor spacing

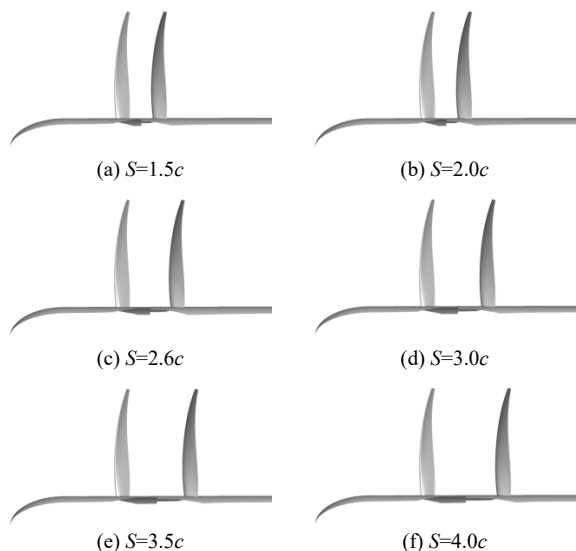


图 3 不同轴向间距的计算模型

Fig. 3 Calculation model of different axial spacings

1.3 计算方法和网格无关性验证

基于中国空气动力研究与发展中心搭建的某型 6 叶单排螺旋桨气动和气动噪声测试试验台, 文献 [31, 34] 对比了螺旋桨气动和气动噪声的数值计算结果和风洞试验结果。研究表明, 本文采用的计算方法具有良好的精度和可靠性, 能够满足本文对对转螺旋桨气动和声学性能的研究。计算域和边界条件的设置如图 4 所示(图中 R 为转子半径), 和文献 [31] 中的设置基本一致。

因为叶片具有空间周期性, 所以在周期性边界的情况下只需模拟一个叶片通道。为了验证网格数量对计算结果的影响, 本文采用了 4 套不同网格数量的网格开展了网格无关性验证, 具体结

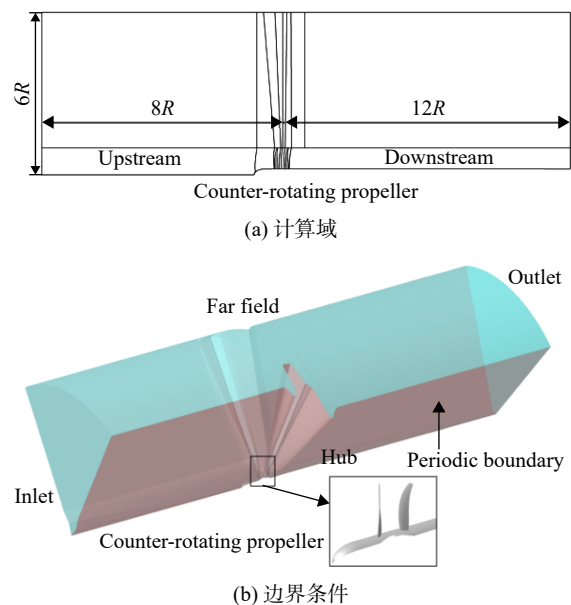


图 4 计算域与边界条件示意图

Fig. 4 Sketch of computation domain and boundary conditions

果如图 5 和表 2 所示。图 5 给出了不同网格数量下, 前排转子 50% 叶高处的表面压力系数和对转螺旋桨总声压级指向性分布, 图中 l 为 50% 叶高处弦长距前缘的距离, L 为前排转子 50% 叶高处叶片弦长。结果表明, 表面压力系数随网格数量的增加变化不大, 对转螺旋桨噪声的误差在 1%

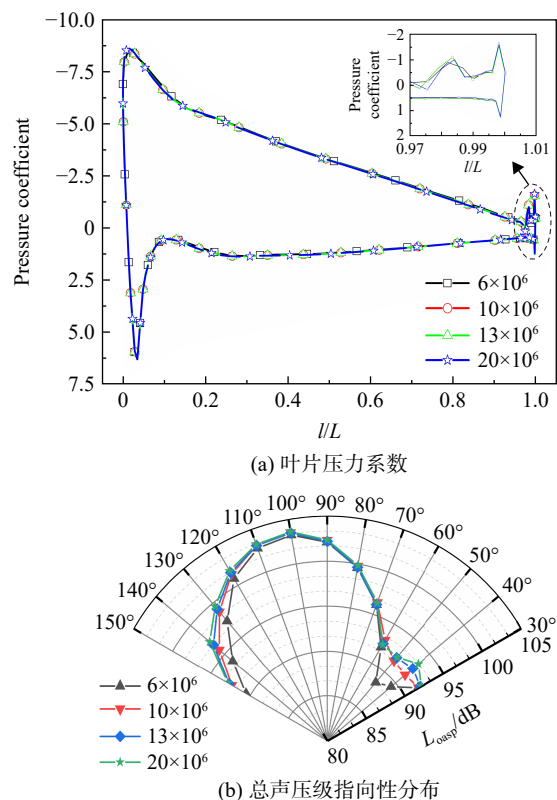


图 5 网格无关性验证

Fig. 5 Grid independence verification

表 2 气动力网格无关性验证

Table 2 Grid independence verification for aerodynamic performance

网格数量/ 10^4	推力/N		误差/%	
	前排	后排	前排	后排
600	-558.78	-618.00	-0.15	-1.44
1 000	-558.96	-625.80	-0.12	-0.20
1 300	-559.62	-627.00		
2 000	-559.00	-627.60	-0.11	0.10

以内。综合考虑计算精度和计算成本,本文最后采用了 1 300 万左右的网格开展数值模拟研究。

2 结果与分析

2.1 转子气动特性

图 6 描述了对转螺旋桨转子轴向间距变化时,前排转子气动性能的变化情况,其中 λ 为前进比。由图 6(a) 和图 6(b) 分析可以得出,随着转子轴向间距的逐渐增大,前排转子的拉力系数和功率系数最大分别增大了 6.5% 和 3.9%。不过,在高前进比的情况下,前排转子的拉力系数和功率系数增大缓慢。由图 6(c) 可知,对转螺旋桨前排转子的效率随着前进比的增大先增大后减小。随着转子轴向间距的增大,前排转子的效率有所增大,

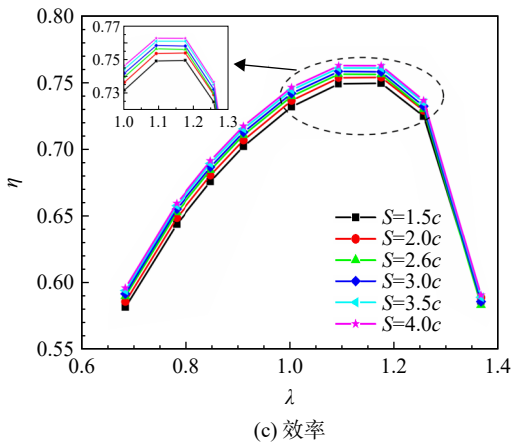
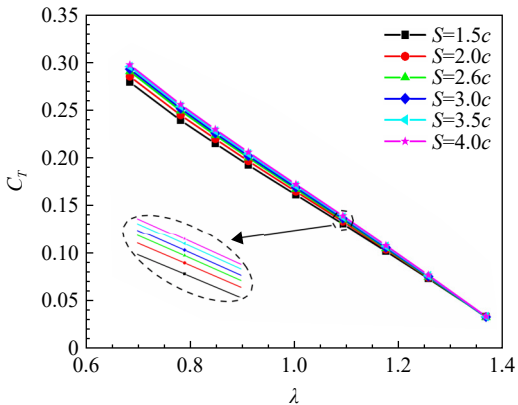


图 6 不同轴向间距 S 对前排转子气动性能的影响

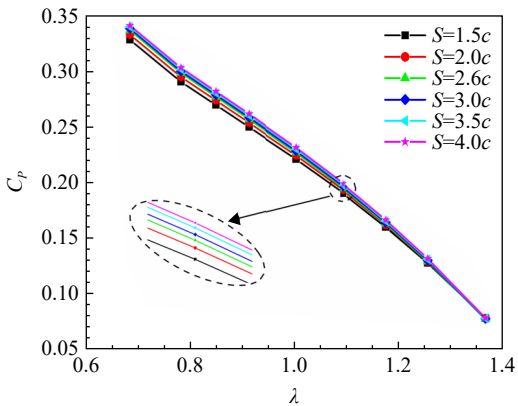
Fig. 6 Influence of different axial spacing S on aerodynamic performance of front rotor

最大增大了 1.8%。由图 6 可以分析得出,随着对转螺旋桨前进比的逐渐增大,转子轴向间距的增加对对转螺旋桨前排转子气动性能的影响不是很大。

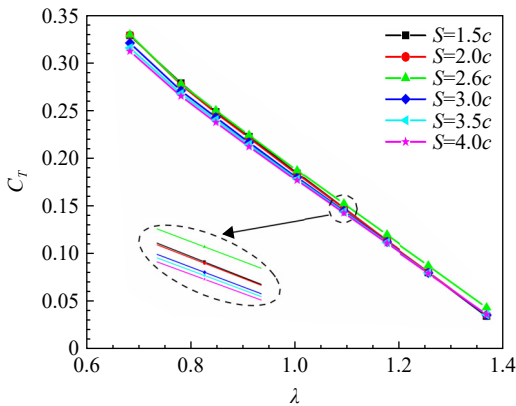
图 7 描述了对转螺旋桨转子轴向间距变化时,后排转子气动性能的变化情况。由图 7(a) 和图 7(b) 分析可以得出,随着转子轴向间距的增大,对转螺旋桨后排转子的拉力系数和功率系数最大分别减小了 5.0% 和 9.4%。在高前进比的情况下,后排转子的拉力系数和功率系数减小得逐渐缓慢。不过,当转子轴向间距 $S=2.6c$ 时,在高前进比的情况下,后排转子的拉力系数和功率系数逐渐变得最大。从图 7(c) 可以看出,随着转子轴向间距的增大,后排转子的效率逐渐增大,最大增大了 4.5%。不过,转子轴向间距 $S=2.6c$ 的对转螺旋桨,随着前进比的增大,其后排转子的效率变得最大。从图 7 中可以看出,转子轴向间距的变化对对转螺旋桨后排转子拉力系数、功率系数和效率有一定的影响。



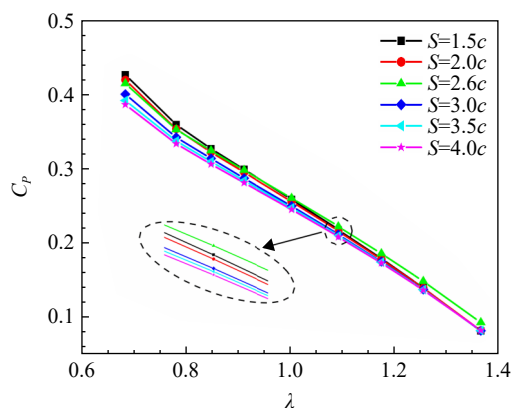
(a) 拉力系数



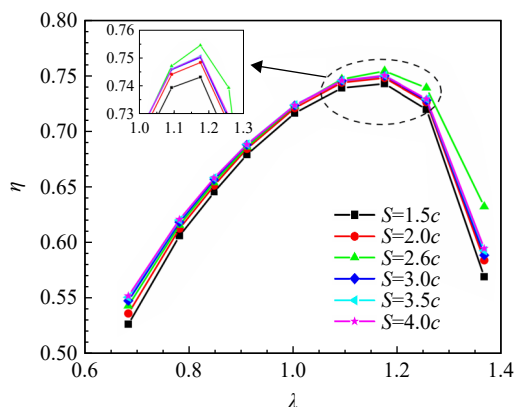
(b) 功率系数



(a) 拉力系数



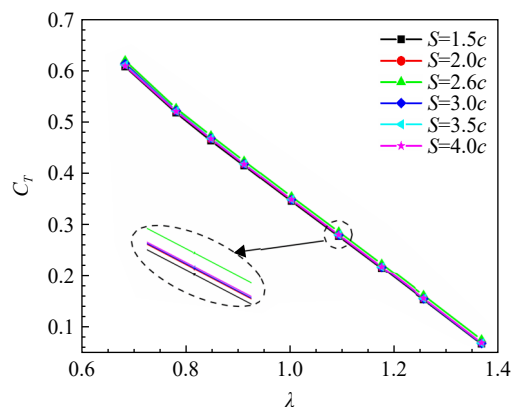
(b) 功率系数



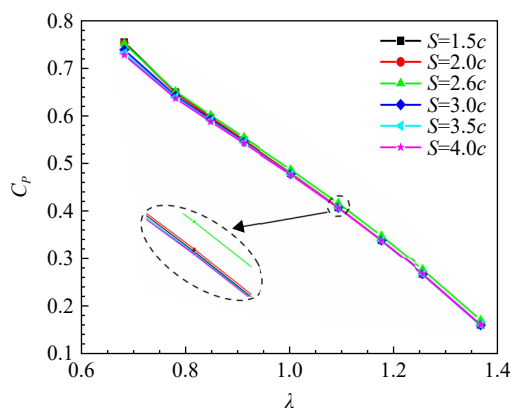
(c) 效率

图 7 不同轴向间距 S 对后排转子气动性能的影响Fig. 7 Influence of different axial spacing S on aerodynamic performance of rear rotor

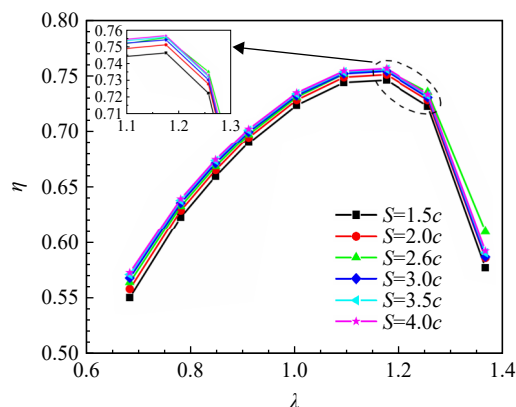
图 8 是不同转子轴向间距的对转螺旋桨总体气动性能随前进比的变化情况。由图 8(a)和图 8(b)可知,随着转子轴向间距的变化,对转螺旋桨拉力系数最大增大了约 2.0%,对转螺旋桨的总功率系数先增大后减小。从图 8(a)和图 8(b)还可以看出,转子轴向间距的变化,对对转螺旋桨的总拉力系数和总功率系数影响不是很大。由图 8(c)可知,随着前进比的增大,对转螺旋桨的



(a) 拉力系数



(b) 功率系数



(c) 效率

图 8 不同轴向间距 S 对对转螺旋桨气动性能的影响Fig. 8 Influence of different axial spacing S on aerodynamic performance of counter-rotating propeller

总体效率先增大后减小。随着转子轴向间距的增大,对转螺旋桨的效率逐渐增大,最大增大了 5.6%。从图 8 中分析可以得到,对转螺旋桨的转子轴向间距 $S=2.6c$ 时,其气动性能较好。

2.2 流场计算结果分析

图 9 为转子轴向间距 $S=1.5c$ 和 $S=4.0c$ 的对转螺旋桨子午面流线及马赫数云图。在起飞工况下,根据动量定律,气流在通过转子后速度增加并且呈现出一种收缩的趋势,螺旋桨载荷越大,气流收缩得越明显。由图 9 分析可知,转子轴向间距越小,气流收缩越明显。

图 10 给出了对转螺旋桨不同站位处的示意图,其中 Z 表示轴向距离, R 表示转子半径。图 11 给出了对转螺旋桨轴向时均速度在不同站位处的径向分布,图中 r 为不同轴向位置距轮毂的距离。由图 11 分析可知,前排转子和后排转子都对来流有加速作用,两次对气流的加速使得对转螺旋桨尾流速度明显增大(其中 w 是轴向速度)。加速区域主要发生在 $0.3R \sim 0.7R$ 之间,在大于叶片

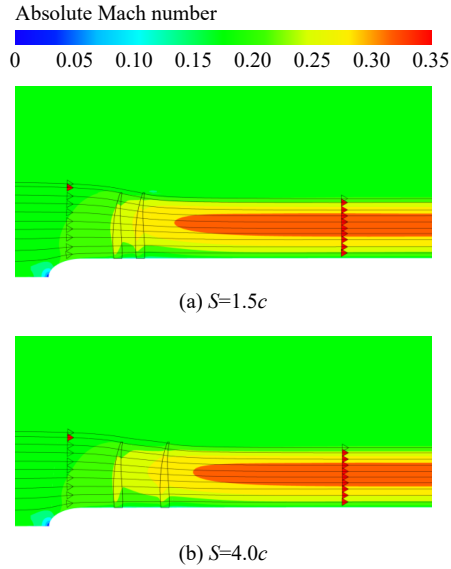


图 9 子午面流线及马赫数云图
Fig. 9 Streamline and Mach number cloud map on a meridional plane

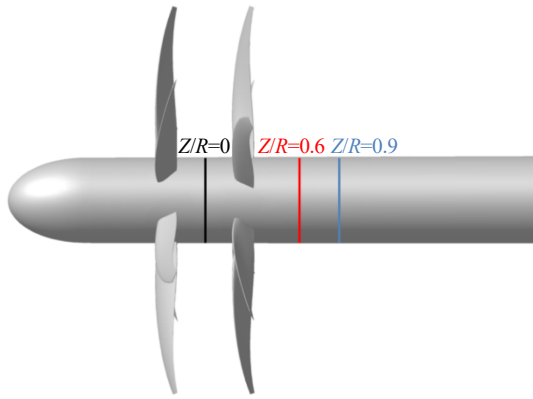


图 10 对转螺旋桨不同截面位置示意图
Fig. 10 Schematic diagram of different cross-section position of the counter-rotating propeller

0.7R 倍半径处, 气流开始减速。从图 11(a)可以看出, 在 $Z/R=0$ 处, 随着对转螺旋桨转子轴向间距的增大, 对转螺旋桨的轴向速度逐渐减小。由图 11(b)知, 在 $Z/R=0.6$ 处, 对转螺旋桨的轴向速度随着转子轴向间距的增大而不断减小。说明转子轴向间距的增大, 减弱了后排转子对气流的加速作用。图 11(c)中对转螺旋桨的轴向速度随着转子轴向间距的增大有着微弱的降低, 但不是很明显。总的来说, 转子轴向间距的增大对对转螺旋桨转子之间的轴向速度有着显著的影响。

图 12 为对转螺旋桨径向时均速度(u)在不同站位处的径向分布。可以看出, 在大部分叶高区域, 径向速度为负, 意味着滑流收缩。从图 12(a)可以看出, 在 $Z/R=0$ 处, 随着转子轴向间距的增大,

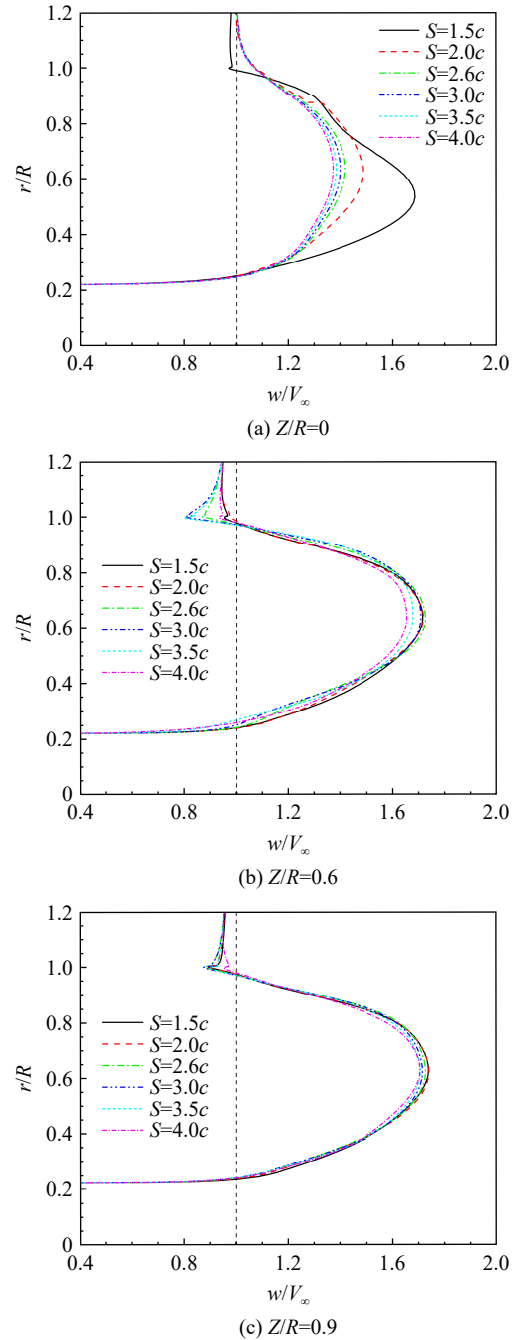


图 11 对转螺旋桨轴向时均速度的径向分布
Fig. 11 Radial profiles of the time-averaged axial velocity of the counter-rotating propeller

对转螺旋桨的径向速度逐渐减小, 说明转子轴向间距的增大导致了对转螺旋桨转子间的滑流收缩减弱。由图 12(b)和图 12(c)中可以看出, 在 $Z/R=0.6$ 处, 随着转子轴向间距的增大, 对转螺旋桨的径向速度逐渐变大, 而且波动也变得越来越; 在 $Z/R=0.9$ 处, 随着截面位置向下游的选取, 对转螺旋桨的径向速度减小, 波动也在随之减小。结合图 12(a)~图 12(c)还可以看出, 随着滑流不断向下游发展, 滑流收缩速度逐渐减弱, 径向速

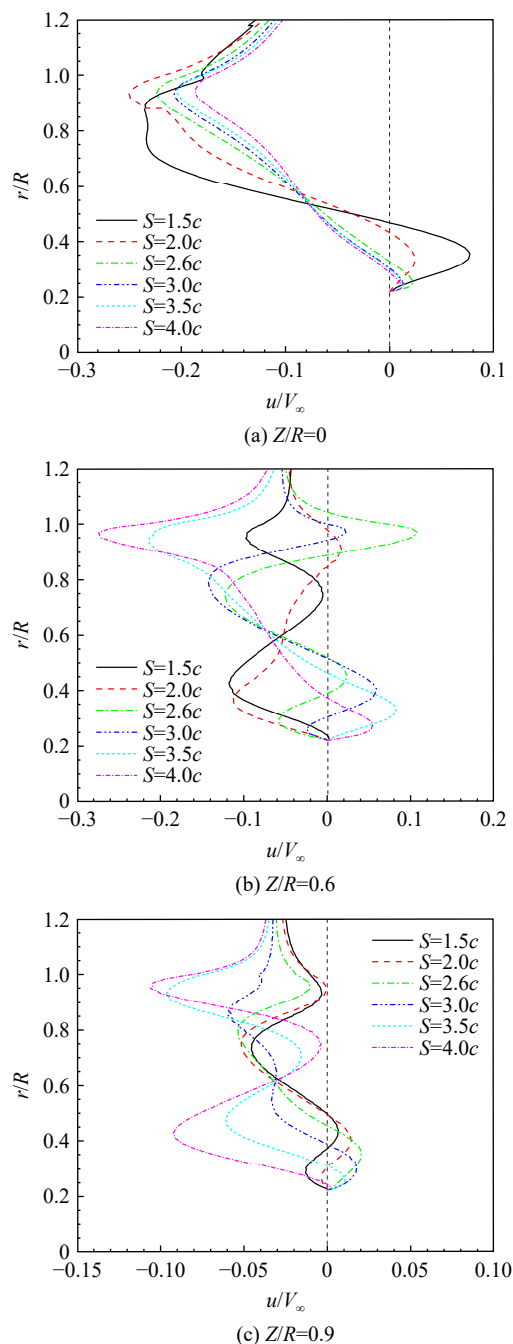


图 12 对转螺旋桨径向时均速度的径向分布

Fig. 12 Radial profiles of radial time-averaged velocity of the counter-rotating propeller

度逐渐接近零,这说明对转螺旋桨滑流的径向收缩逐渐趋于结束。

2.3 声场计算结果分析

对转螺旋桨产生的噪声可以被认为是由厚度噪声、载荷噪声和非线性四极子噪声组成的。其中厚度噪声和定常载荷噪声属于定常噪声源,是典型的单频噪声,与螺旋桨旋转周期相关。此外,还有前后排螺旋桨干涉产生的非定常载荷噪声源。厚度噪声是桨叶周期性排挤空气导致,其噪声幅

射强度与桨叶的体积有关,频率特性取决于旋转速度。厚度噪声是单极子声源,在高速条件下非常重要;载荷噪声是由桨叶所受的气动力(升力和阻力)产生的,属于偶极子声源;非线性四极子噪声当桨尖达到跨声速运行时,对噪声的贡献较大。

利用非线性谐波法求解对转螺旋桨流场,获得桨叶表面的流场信息后,然后利用声类比理论和FW-H方程求解声场。设置了13个远场传声器,位置如图13所示,传声器距离坐标原点为6 m,覆盖的测量角度范围为 $30^{\circ} \sim 150^{\circ}$,间隔为 10° 。

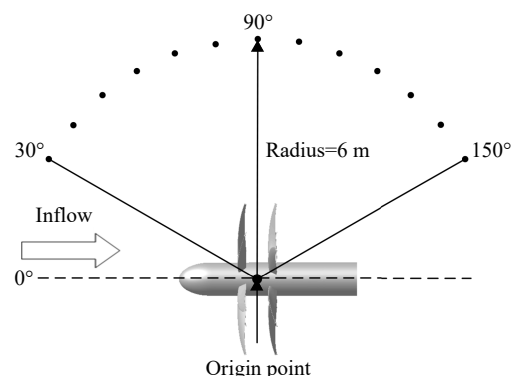
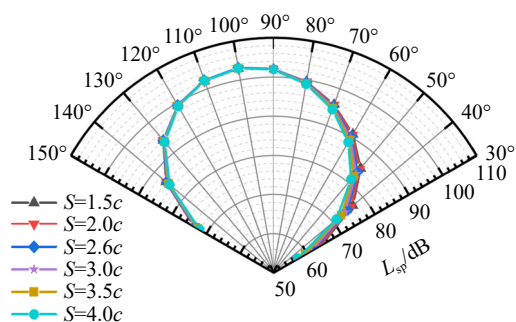


图 13 传声器位置示意图

Fig. 13 Microphone location diagram

图14为对转螺旋桨转子轴向间距变化时,不同频率下对转螺旋桨声指向性,图中 L_{sp} 表示声压级。由图14(a)可知,在叶片通过频率下,对转螺旋桨噪声呈现出典型的偶极子辐射模式。对转螺旋桨噪声在BPF1(blade passing frequency of rotor 1)下,转子轴向间距的增大对BPF1频率下的噪声没有太大影响。但前排转子上游处BPF1频率下的噪声随着转子轴向间距的增大略有降低。从图14(b)中可以看出,在干涉频率下,对转螺旋桨噪声呈现出更加复杂的辐射模式。在BPF1+BPF2频率下,转子轴向间距的增大,可以降低对转螺旋桨的干涉噪声,降低干涉噪声在10 dB以上,说明转子轴向间距的增大,减弱了前后排转子之间



(a) BPF1处

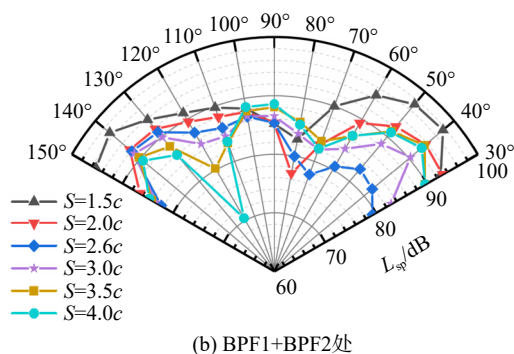


图 14 不同频率下对转螺旋桨声指向性

Fig. 14 Acoustic directivity of counter-rotating propellers at different frequencies

的相互干扰。不过在部分角度($80^\circ \sim 100^\circ$)下, 对转螺旋桨的干涉噪声随着转子轴向间距的增大略微增大。综合对比分析来看, 增大前后排转子轴向间距的方法, 可以降低一定的对转螺旋桨干涉噪声。

图 15 为对转螺旋桨转子轴向间距变化时, 对转螺旋桨远场辐射噪声总声压级分布(L_{osap})。可以看出, 对转螺旋桨产生的噪声与转子轴向间距的变化有一定的关系。在转子轴向间距越大的情况下, 远场辐射噪声总声压级就越小, 噪声的抑制效果就越明显, 大约降低了 10 dB。随着转子轴向间距的继续增大, 降噪效果变得不是很明显。整体而言, 转子轴向间距的增大, 可以降低对转螺旋桨的噪声。

图 16 描述的是转子轴向间距变化时, 对不同角度下对转螺旋桨总声压级的影响。随着转子轴向间距的增大, 对转螺旋桨噪声降低幅度在减缓。在方位角 $\theta=40^\circ$ 的情况下, 当转子轴向间距不断

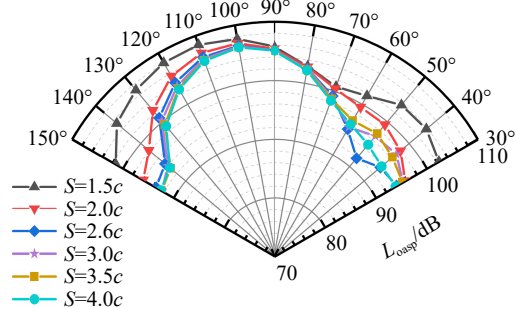


图 15 对转螺旋桨远场辐射噪声总声压级分布

Fig. 15 Total sound pressure level distribution of far field radiated noise from counter-rotating propeller

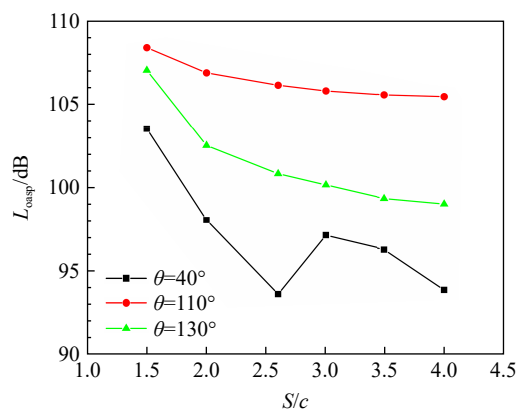
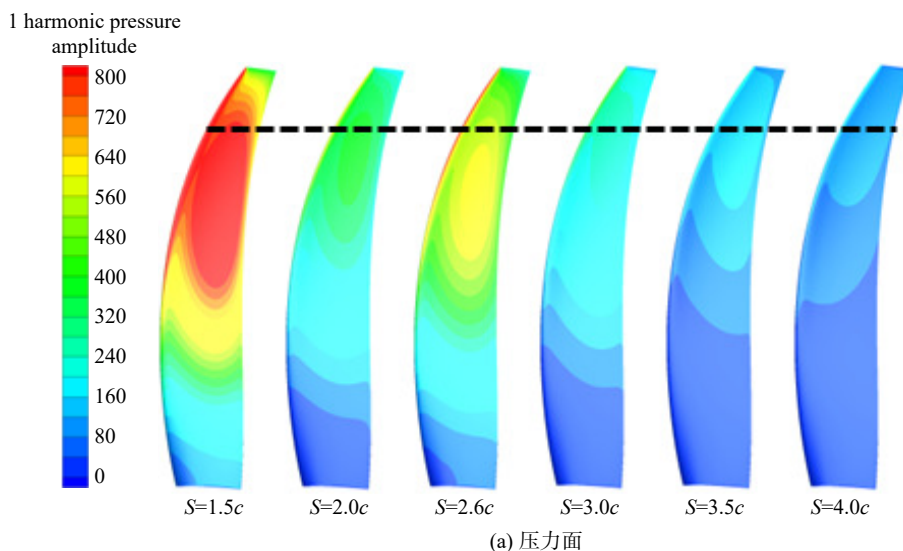


图 16 不同角度下总声压级随转子轴向间距的变化

Fig. 16 Variation of total sound pressure level with rotor axial spacing at different angles

增大时, 对转螺旋桨噪声先减小再增大后减小。通过图 16 还可以看出, 随着转子轴向间距的增大, 130° 方位角下的降噪效果明显大于 110° 方位角下的降噪效果。

叶片表面载荷与载荷噪声大小直接紧密相关。图 17 给出了前排转子叶片表面上的 1 阶谐波压



(a) 压力面

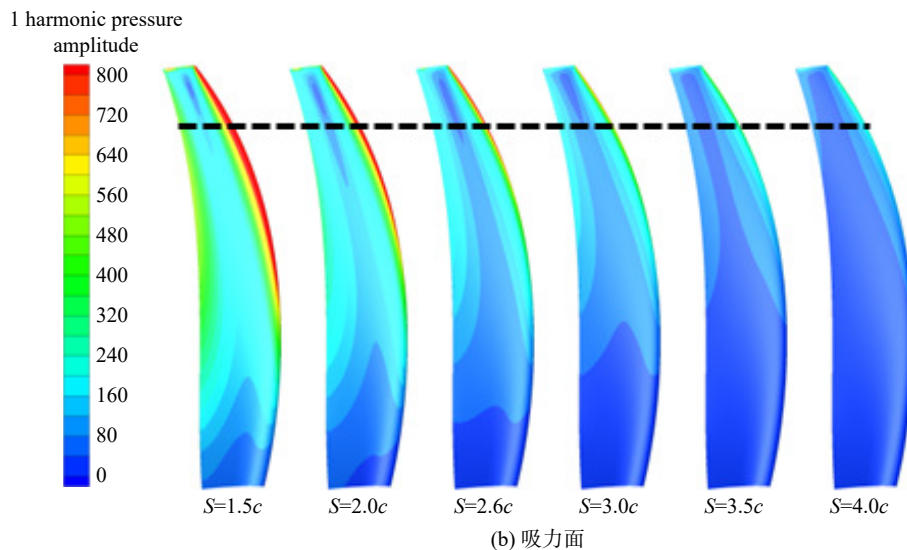


图 17 前排转子叶片表面上的 1 阶谐波压力幅值分布

Fig. 17 1st harmonic pressure amplitude distribution on the front row rotor blade surface

力幅值。可以看出,在位于桨叶 50% 叶高到桨尖的区域,前排转子尾缘处 1 阶谐波压力幅值较大。当转子轴向间距逐渐增大时,前排转子压力面和吸力面的谐波压力幅值逐渐降低,特别是前排转子的尾缘处 1 阶谐波压力幅值降低得更加明显。

图 18 显示了前排转子在 85% 叶高处压力面和吸力面 1 阶谐波压力幅值。从图 18(a)和图 18(c)可以看出,对转螺旋桨转子轴向间距的增大,可以降低前排转子压力面和吸力面的 1 阶谐波压力幅值,尤其是在尾缘处。从图 18(b)和图 18(d)

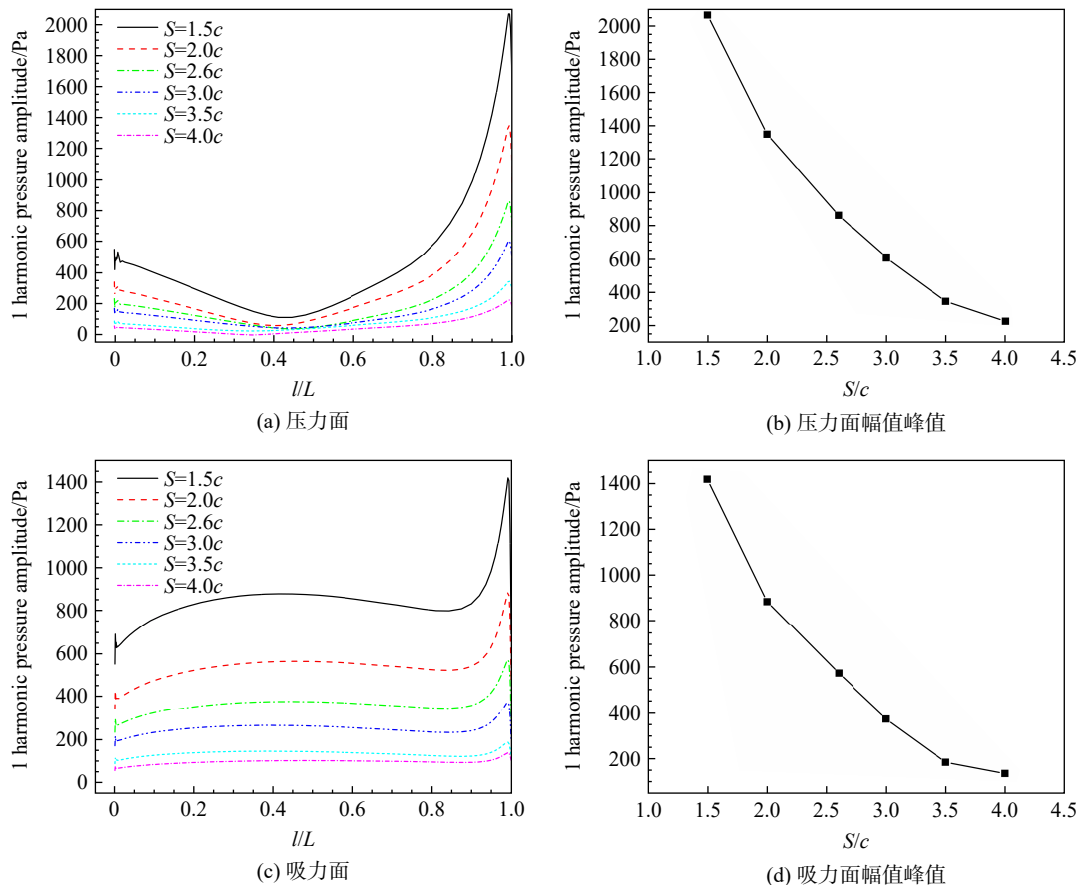


图 18 85% 叶高处前排转子 1 阶谐波压力幅值

Fig. 18 1st harmonic pressure amplitude of front rotor at 85% blade height

中可以更加清楚地看到,不管是压力面还是吸力面都是如此。随着转子轴向间距的增大,前排转子尾缘处的 1 阶谐波压力幅值峰值在不断降低。不过,随着转子轴向间距的增大,尾缘处压力面和吸力面的 1 阶谐波压力幅值峰值降低速度在减缓。前排转子尾缘处压力面和吸力面的 1 阶谐波压力幅值峰值降低幅度分别由 714 Pa 和 530 Pa 减缓到 120 Pa 和 48 Pa。通过以上分析可知,转子轴向间距的增大,减弱了后排转子对前排转子的势流场干涉,进而导致前排转子尾缘处的谐波压力降低。

图 19 是后排转子叶片表面上 3 阶谐波压力幅值的分布。在 50% 叶高处附近,后排转子前缘处 3 阶谐波压力幅值较大。通过谐波压力幅值分布云图可以看出,随着转子轴向间距的增大,后

排转子压力面和吸力面的 3 阶谐波压力幅值降低,特别是在前缘处降低得更加明显。

图 20 描述了后排转子在 75% 叶高处压力面和吸力面 3 阶谐波压力幅值。从图 20(a)和图 20(c)可以看出,对转螺旋桨转子轴向间距的增大,可以降低后排转子压力面和吸力面的 3 阶谐波压力幅值,特别是在前缘处。图 20(b)和图 20(d)是压力面和吸力面幅值峰值随着转子轴向间距改变的变化情况。后排转子前缘处的 3 阶谐波压力幅值峰值明显,且随着转子轴向间距的增大在不断降低。不过,随着转子轴向间距的增大,前缘处压力面和吸力面的 3 阶谐波压力幅值峰值降低速度在减缓。后排转子前缘处压力面和吸力面的 3 阶谐波压力幅值峰值降低幅度分别由 92 Pa 和 86 Pa 减缓到 33 Pa 和 23 Pa。通过云图和线图

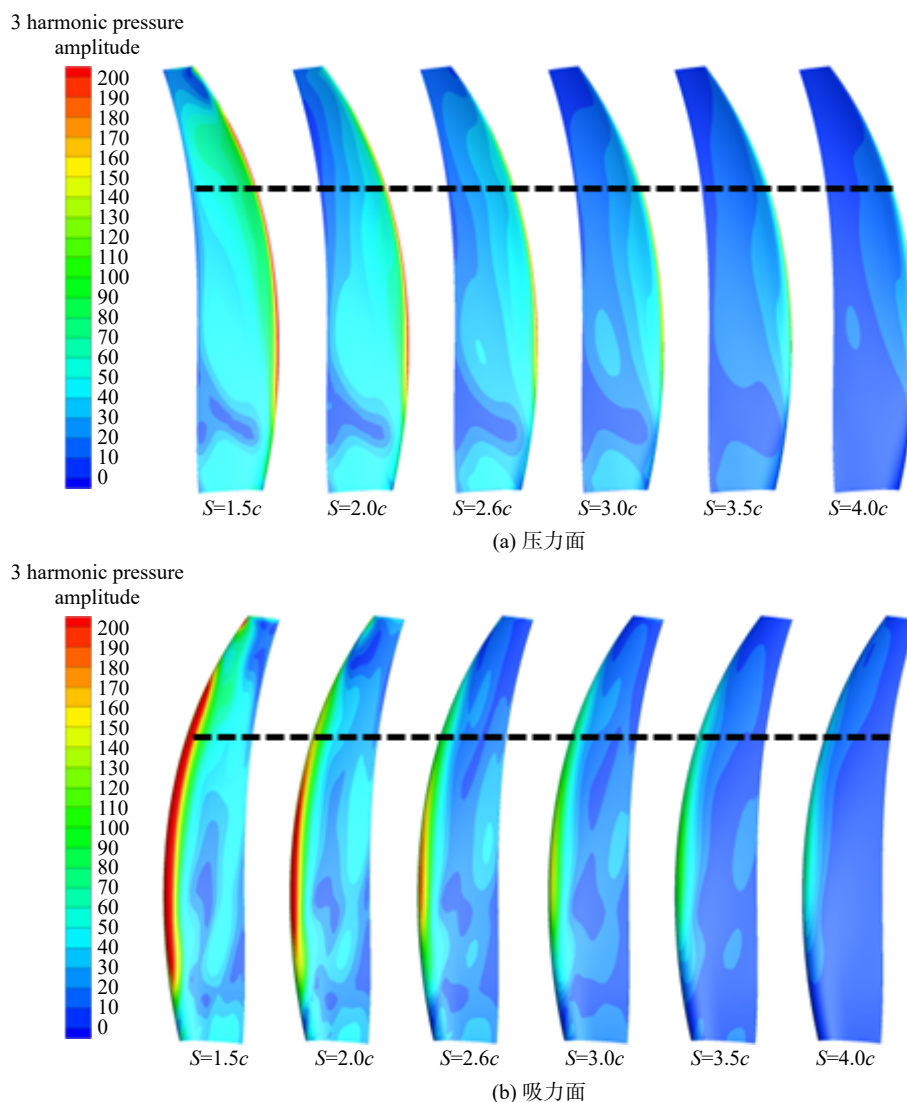


图 19 后排转子叶片表面上的 3 阶谐波压力幅值分布

Fig. 19 3rd harmonic pressure amplitude distribution on the rear rotor blade surface

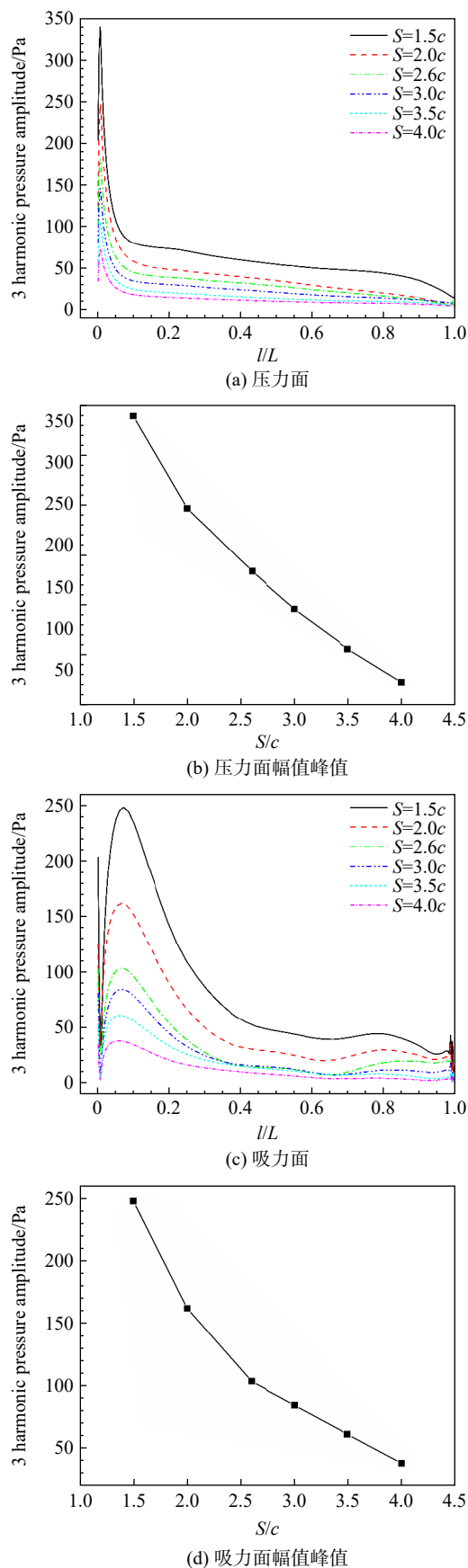


图 20 75% 叶高处后排转子 3 阶谐波压力幅值

Fig. 20 3rd harmonic pressure amplitude of rear rotor at 75% blade height

分析可知,对转螺旋桨转子轴向间距的增大,减弱了前排转子桨尖涡和黏性尾迹与后排转子的干涉作用,降低了前后排转子之间的气动干扰。所以转子轴向间距的增大降低了后排转子的噪声贡献,因此对转螺旋桨的气动噪声在减小,这与对转螺旋桨总声压级指向性分布(图 15)相对应。

3 结 论

本文利用 NLH 法和 FW-H 方程相结合的方法数值模拟研究了转子轴向间距的变化对对转螺旋桨性能和噪声的影响,得到的主要结论如下:

1) 在转子轴向间距增大的情况下,前排转子的拉力系数和功率系数逐渐增大,后排转子的拉力系数和功率系数逐渐减小,对转螺旋桨的总性能变化不大,相比最小转子轴向间距情况,对转螺旋桨的效率略微增大。

2) 对转螺旋桨转子轴向间距的增大对前后排转子之间的轴向速度有着显著的影响,对 $Z/R=0.9$ 后的气流轴向速度影响不大。随着转子轴向间距的增大,对转螺旋桨的径向速度减小,进而减弱了对转螺旋桨转子间的滑流收缩。

3) 对转螺旋桨转子轴向间距的优化结果,相比最小转子轴向间距,对转螺旋桨噪声降低约 10 dB,效率提升了 1.4%。该结果表明,改变转子轴向间距可以降低对转螺旋桨的噪声。

4) 转子轴向间距的增大,可以显著降低前排转子尾缘处和后排转子前缘处的谐波压力幅值。因此,减弱了后排转子对前排转子的势流场影响,以及前排转子桨尖涡和黏性尾迹对后排转子的干涉作用。

参考文献:

- [1] 刘沛清. 空气螺旋桨理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [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] 严成忠. 绿色动力: 开式转子航空发动机[J]. 航空科学技术, 2013, 24(1): 6-12.
YAN Chengzhong. Green power: open rotor aero-engine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013, 24(1): 6-12. (in Chinese)
- [4] 张帅, 夏明, 钟伯文. 民用飞机气动布局发展演变及其技术影响因素[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 30-44.
ZHANG Shuai, XIA Ming, ZHONG Bowen. Evolution and technical factors influencing civil aircraft aerodynamic configuration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 30-44. (in Chinese)

- [5] 王启航, 周莉, 王占学. 对转开式转子气动设计方法[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 20220175.
WANG Qihang, ZHOU Li, WANG Zhanxue. Aerodynamic design method of contra-rotating open rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 20220275. (in Chinese)
- [6] VAN ZANTE D E, COLLIER F, ORTON A, et al. Progress in open rotor propulsors: the FAA/GE/NASA open rotor test campaign[J]. *The Aeronautical Journal*, 2014, 118(1208): 1181-1213.
- [7] 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: 115089.
- [8] HORVÁTH C, ENVIÁ E, PODBOY G G. Limitations of phased array beamforming in open rotor noise source imaging[J]. *AIAA Journal*, 2014, 52(8): 1810-1817.
- [9] PETERS A, SPAKOVSKY Z S. Rotor interaction noise in counter-rotating propfan propulsion systems[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(1): 011002.1-011002.12.
- [10] HUBBARD H H. Sound from dual-rotating and multiple single-rotating propellers[R]. NACA TN No. 1654, 1948.
- [11] HAGER R, VRABEL D. Advanced turboprop project[R]. NASA SP-495, 1988.
- [12] WOODWARD R P. Noise of two high-speed model counter-rotating propellers at takeoff/approach conditions[J]. *Journal of Aircraft*, 1992, 29(4): 679-685.
- [13] DITTMAR J, STANG D B. Noise reduction for model counterrotation propeller at cruise by reducing aft-propeller diameter[R]. Indianapolis, US: 113th Meeting of the Acoustical Society of America, 1987.
- [14] DITTMAR J, GORDON E, JERACKI R J. The effect of front-to-rear propeller spacing on the interaction noise at cruise conditions of a model counterrotation propeller having a reduced diameter aft propeller[R]. NASA-TM-101329, 1988.
- [15] SPALART P, TRAVIN A, SHUR M, et al. Initial noise predictions for open rotors using first principles[R]. AIAA 2010-3973, 2010.
- [16] SMITH D A, FILIPPONE A, BARAKOS G N. Noise source analysis in counter-rotating open rotors[J]. *AIAA Journal*, 2022, 60(3): 1783-1796.
- [17] STUERMER A, YIN Jianping. Installation impact on pusher CROR engine low speed performance and noise emission characteristics[J]. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 2012, 4(1/2): 59-68.
- [18] 史文博, 李杰. 对转螺旋桨流场气动干扰数值模拟[J]. 航空动力学报, 2019, 34(4): 829-837.
SHI Wenbo, LI Jie. Numerical simulation of contra-rotating propeller flowfield aerodynamic interactions[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4): 829-837. (in Chinese)
- [19] 夏贞锋, 杨永. 对转开式转子非定常气动干扰特性分析[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 835-843.
XIA Zhenfeng, YANG Yong. Characteristic analysis of unsteady aerodynamic interactions of contra rotating open rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 835-843. (in Chinese)
- [20] 袁培博. 高效对转桨扇级间气动干涉规律与实验验证研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
YUAN Peibo. Research on aerodynamic interference law and experimental validation of high efficiency contra rotating prop-fan[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021. (in Chinese)
- [21] 蔡明轩. 对转螺旋桨级间气动干涉研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
CAI Mingxuan. Research on aerodynamic interference between contra rotating propellers[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [22] 孙晓峰, 胡宗安. 桨扇的气动弹性力学和气动声学[J]. 航空动力学报, 1987, 2(4): 299-302, 368.
SUN Xiaofeng, HU Zongan. On aeroelasticity and aeroacoustics of propfan[J]. Journal of Aerospace Power, 1987, 2(4): 299-302, 368. (in Chinese)
- [23] 李晓东, 孙晓峰, 胡宗安, 等. 考虑飞机舱壁影响的螺旋桨声场时域预测法[J]. 航空学报, 1993, 14(11): 585-591.
LI Xiaodong, SUN Xiaofeng, HU Zongan, et al. A time domain method for propeller noise prediction including aircraft fuselage effect[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1993, 14(11): 585-591. (in Chinese)
- [24] 严成忠. 开式转子发动机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [25] 中国空气动力研究与发展中心. 对转螺旋桨气动力和气动噪声试验圆满完成[EB/OL]. [2022-10-01]. <https://www.cardc.cn/News-Read.Asp?ChannelId=2&ClassId=5&Id=323>.
- [26] 陈正武, 姜裕标, 赵昱, 等. 对转螺旋桨气动力和气动噪声风洞试验技术[J]. 航空动力学报, 2024, 39(5): 20220476.
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): 20220476. (in Chinese)
- [27] 王雷, 刘波. 非线性谐波法在对转压气机中的校验分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1448-1455.
WANG Lei, LIU Bo. Validation of nonlinear harmonic method in dual-stage counter-rotating compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7): 1448-1455. (in Chinese)
- [28] HE L, CHEN T, WELLS R G, et al. Analysis of rotor-rotor and stator-stator interferences in multi-stage turbomachines[J]. *Journal of Turbomachinery*, 124(4): 564-571.
- [29] 赵军, 刘宝杰. 基于非线性谐波法的跨声速压气机确定应力建模[J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2440-2449.
ZHAO Jun, LIU Baojie. Deterministic stress modelling in transonic compressor based on nonlinear harmonic method[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(10): 2440-2449. (in Chinese)
- [30] 药晓江, 董景新, 尚捷, 等. 非线性谐波法在叶轮机械非定常计算中的应用[J]. 推进技术, 2016, 37(4): 632-639.
YAO Xiaojiang, DONG Jingxin, SHANG Jie, et al. Application of non-linear harmonic in turbomachinery 3D flow field unsteady simulation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(4): 632-639. (in Chinese)
- [31] 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 proeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(8): 1749-1760. (in Chinese)
- [32] DECONINCK T, CAPRON A, HIRSCH C, et al. Prediction of near-and far-field noise generated by contra-rotating open rotors[J]. *International Journal of Aeroacoustics*, 2012, 11(2): 177-196.
- [33] FERRANTE P, VILMIN S, HIRSCH C, et al. Integrated "CFD - acoustic" computational approach to the simulation of a contra rotating open rotor at angle of attack[R]. AIAA-2013-2242, 2013.
- [34] WEI Chunhua, JIAO Lingrui, TONG Fan, et al. Pressure field measurements on large-scale propeller blades using pressure-sensitive paint[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2022, 38(2): 121366.

(编辑: 陈越)