

文章编号: 1674-8190(2023)06-037-08

# 后桨桨距角对某共轴对转螺旋桨性能影响规律研究

孙召政<sup>1</sup>, 闫文辉<sup>1</sup>, 曹德松<sup>2</sup>

(1. 北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

(2. 航空工业惠阳航空螺旋桨责任有限公司 设计所, 保定 071051)

**摘要:** 共轴对转螺旋桨的桨距角对前后排桨的桨间气动干扰有重要影响, 能够改变螺旋桨的气动性能。为了研究后桨桨距角对共轴对转螺旋桨的气动干扰影响, 改善螺旋桨的气动性能, 在来流马赫数0.453的情况下, 通过调节后桨桨距角的方式对6×6构型的共轴对转螺旋桨进行数值计算, 数值计算中使用非定常雷诺平均纳维-斯托克斯(URANS)方程结合SST湍流模型的方法, 并采用T-Rex高质量网格生成技术研究桨距角对共轴对转螺旋桨桨间气动干扰的变化规律。结果表明: 后桨在前排桨产生的预旋气流作用下, 能够吸收一部分前桨的切向滑流能量, 且气动效率高于前桨, 前后桨的气动参数在一个旋转周期内出现12次周期性波动; 共轴对转桨的前后桨转速相同时, 前桨桨距角不变, 减小后桨桨距角, 前后桨的气动效率都会增加, 后桨效率提升明显。

**关键词:** 共轴对转螺旋桨; 桨叶角度; 气动干扰; 雷诺平均方程

中图分类号: V211.44

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.04

## Effect rules of aft propeller pitch angle on the performance of contra rotation propeller

SUN Zhaozheng<sup>1</sup>, YAN Wenhui<sup>1</sup>, CAO Desong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

(2. Design Department, AVIC Huiyang Aviation Propeller Co., Baoding 071051, China)

**Abstract:** The pitch angle of the contra rotation propeller (CRP) has important effect on the aerodynamic interference between the front and aft blades, which can change the aerodynamic performance of the propeller. In order to study the aerodynamic influence of pitch angle on the contra rotation propeller and improve the aerodynamic performance of propellers, at the inlet Mach number of 0.453, the numerical calculation is carried out by adjusting the blade pitch angle after about 6×6 configuration contra rotation propeller, in which the method is used by combining unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) equation with SST turbulence model. The T-Rex high quality grid generation technique is used to study the change rule of the pitch angle of contra rotating propeller on aerodynamic interference. The results show that the aft propellers are under the action of pre-swirling air from the front propellers, the aft propellers can absorb a part of the tangential slip flow energy of the front propellers, and the aerodynamic efficiency is higher than that of the front propellers. The aerodynamic parameters of the front and aft propellers fluctuate 12 times in a rotating cycle. When the rotating speed of frond and aft propellers maintains the same, the pitch angle of the front propellers maintains constant, and the pitch angle of the aft propellers is reduced, the aerodynamic efficiency of the front and aft propellers is increased, and the efficiency of aft propellers is improved significantly.

**Key words:** contra rotation propeller; pitch angle; aerodynamic interference; Reynolds-averaged equation

收稿日期: 2022-08-30; 修回日期: 2022-11-05

基金项目: 先进航空动力创新工作站项目(HKXC2020-02-024)

通信作者: 闫文辉, abuaa@163.com

引用格式: 孙召政, 闫文辉, 曹德松. 后桨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 rules 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)

## 0 引言

20 世纪 70 年代,受到石油危机引发的能源紧张影响,能源节约和燃油高效利用成为航空设计的目标。美国国会批准了由 NASA 提出的高能效飞行器计划(ACCE),目标是研发将油耗节约 50% 的技术,其中先进涡桨项目(Advanced Turboprop Project,简称 ATP)极大地促进了桨扇发动机的发展<sup>[1]</sup>。近年来,绿色环保逐渐成为时代的主题,航空界对于绿色航空的要求进一步提高,由 NASA 主导,波音、洛马公司参与的“环保飞机”(Environmentally Responsible Aviation,简称 ERA)计划以及欧盟推出的“洁净天空”(Clean Sky)计划和第二期面向 2050 年的“洁净天空 2”(Clean Sky 2)等<sup>[2-5]</sup>,都是国际上对高效率、低排放航空发动机的代表性研究计划。在这些研究中,共轴对转螺旋桨(Contra Rotating Propeller,简称 CRP)作为一种扭矩自平衡、低耗油率、高推进效率、低排放的推进系统又一次吸引了研究者的目光。

共轴对转桨前桨的滑流对后桨的桨叶尾流发展有重要影响,这使得对转螺旋桨具有复杂的气动干扰<sup>[6]</sup>,因此,针对这种气动干扰进行研究,掌握共轴对转螺旋桨前后桨之间气动干扰变化规律,对于设计高效的共轴对转螺旋桨具有重要意义<sup>[7]</sup>。国内外研究者分别对共轴对转螺旋桨的气动特性进行了研究,得到了一些有意义的成果。德国 A. Stuermer<sup>[8-9]</sup>利用德国航天中心的 TAU 代码,基于非结构网格对八叶片螺旋桨以及 8×8 桨叶数配置的共轴对转螺旋桨进行了空气动力学分析,研究了来流攻角对螺旋桨受力的影响,分析了前后桨之间的复杂气动干扰;英国南安普顿大学的 P. Chaitanya 等<sup>[10]</sup>使用 W61-35 无刷直流电机驱动特定桨叶,研究了前后排转子之间的距离对共轴对转螺旋桨产生的气动影响,获得了对转螺旋桨噪声最小、气动效率最高的前后排转子距离范围;英国曼彻斯特大学的 D. A. Smith 等<sup>[11]</sup>使用 Trim 程序对共轴对转螺旋桨进行数值分析,采用锁定前排或后排叶片、增加前旋翼直径等方法,研究了减少共轴对转螺旋桨噪声干扰的方法,取得了一定的降噪成果;法国空客公司 B. Francois 等<sup>[12]</sup>基于 URANS 方法,用 elsA 和 ENSOLV 代码对共轴对转螺旋桨数值计算产生的影响进行了比较,并分

别研究了前后排转子对整桨产生气动干扰的因素,取得了一定的成果。国内,崔盼望等<sup>[13]</sup>基于声类比模型和非线性谐波法,研究了不同后排转子直径对共轴对转螺旋桨的声学特性和气动干扰的影响,结果表明,对转螺旋桨的尾迹干涉、桨尖涡干涉以及前后排桨叶的势流场干涉随后排转子直径的减小而减弱;邵伟平等<sup>[14]</sup>研究了桨尖涡对桨尖的影响,通过对桨尖几何安装角的修正,进行了悬停状态的共轴双旋翼桨叶扭转设计;吕昌昊等<sup>[15]</sup>将共轴对转螺旋桨气动载荷快速预测方法与气动噪声快速预测理论相结合,通过对比不同前后等桨叶数对转桨与总桨叶数相同情况下不同前后桨叶数的气动噪声情况,得出了改善气动噪声的前后桨搭配方案;史文博等<sup>[16]</sup>基于结构网格动态面搭接技术结合 URANS 方法,对共轴对转螺旋桨模型进行了数值计算,研究了前桨桨叶尾迹和桨尖涡与后桨的气动干扰作用,研究发现,桨尖涡在向下游发展不断耗散的过程中产生一定程度的收缩;卢丛玲等<sup>[17]</sup>建立了一套高效的配平方法,保证共轴旋翼悬停状态扭矩平衡,结合运动嵌套网格技术,对双旋翼与单旋翼的悬停状态进行气动分析,得到了其流场特征和气动性能,分析了共轴刚性旋翼产生气动干扰的部分机理;闫文辉等<sup>[18-19]</sup>基于滑移网格技术,对螺旋桨进行了 CFD 数值计算,研究了对转螺旋桨前后桨之间、旋翼螺旋桨与机翼之间的复杂气动干扰。

调研发现,国内外研究者针对共轴对转螺旋桨的不同设计参数(前后转子距离、来流攻角、转子直径、桨叶数等)进行了富有成效的研究分析。但目前这些设计参数对共轴对转螺旋桨产生的气动影响规律尚未完全清楚,有待于进一步研究。鉴于此,本文基于雷诺平均非定常纳维-斯托克斯方程耦合 SST 湍流模型方法,使用 T-Rex 高质量网格生成技术生成螺旋桨网格,采用滑移网格技术针对后桨桨距角因素展开数值模拟,分析共轴对转桨非定常气动参数变化情况;为验证计算方法的准确性,对某三叶变距螺旋桨、Graupner E-prop 螺旋桨进行建模仿真,将数值计算结果与风洞实验数据进行对比验证;在获得验证的计算方法及网格无关性研究的基础上,针对 6×6 构型的共轴对转螺旋桨进行数值计算,通过固定来流马赫

数、前桨浆距角,研究不同后桨浆距角下共轴对转螺旋桨间气动干扰的变化规律,获得不同后桨浆距角下共轴对转螺旋桨的效率特性、功率特性和拉力特性等;根据数值计算的结果,针对后桨浆距角对共轴对转螺旋桨产生的气动干扰变化规律进行总结,提出改善气动性能的方法。

## 1 几何模型与研究方案

本文采用的共轴对转螺旋桨几何模型如图1所示,直径 $D=0.7\text{ m}$ ,前后桨间距 $0.2767D$ ,桨毂直径 $0.2D$ 。采用Pointwise软件对共轴对转螺旋桨的几何模型进行网格划分,基于非结构网格生成方法,使用T-Rex技术生成高质量的边界层网格,边界层数为30,壁面法向第一层网格高度满足 $5\times 10^{-6}\text{ m}$ ,近壁面最大 $Y^+$ 小于1。计算网格的内部为两个单排螺旋桨的旋转区域,外部为非旋转的固定外场区域,总网格量为1500万,共轴对转桨网格示意图如图2所示。使用Ansys CFX软件进行CFD数值计算,基于滑移网格方法,旋转区域与非旋转区域间设置interface进行数据的插值交换,对流项采用高精度格式(High Resolution),边界条件为来流条件、远场条件和固壁边界条件,进口条件根据飞行高度和来流马赫数计算总温和总压,来流方向垂直于进口边界,远场边界条件设置为开放型,湍流度设置为零梯度(Zero Gradient)。通过改变后桨浆距角(浆距角为桨叶70%径向位置处弦线与旋转平面夹角)对共轴对转螺旋桨进行气动干扰分析。

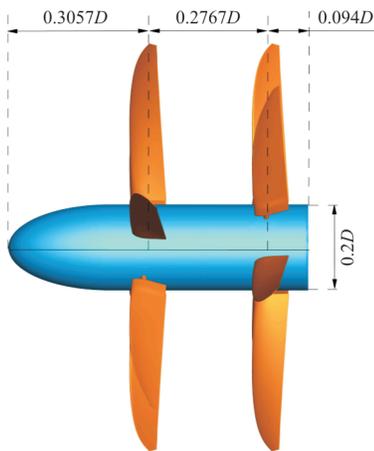
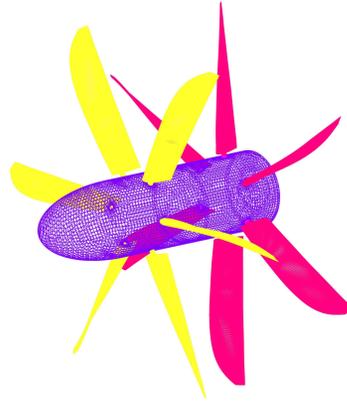
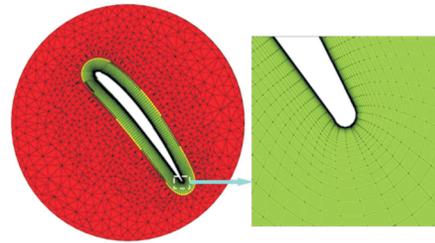


图1 共轴对转螺旋桨几何模型  
Fig. 1 Model of CRP



(a) 共轴对转螺旋桨壁面网格



(b) 共轴对转螺旋桨桨叶空间网格

图2 共轴对转螺旋桨网格划分  
Fig. 2 Mesh of CRP

## 2 流动控制方程及数值验证

用于本文计算的控制方程为时均化的非定常纳维—斯托克斯方程和SST  $k-\omega$  湍流模型,直角坐标系无量纲非定常连续方程、动量方程、能量方程的微分形式分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho E u_i) = \rho f_i u_i + \frac{\partial \pi_{ij} u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为密度; $\mu$ 为动力学黏度系数; $p$ 为压力; $E$ 为总能量, $E = e + \frac{1}{2} u_i u_i$ ;  $\pi_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - p \delta_{ij} - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}$ ;  $q_j = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x_j}$ ,  $T$ 为温度, $\kappa$ 为热传

导系数。

本文采用的湍流模型是 SST $k$ - $\omega$  模型,作为一种混合模型,在近壁面处保留了  $k$ - $\omega$  模型,在远离壁面的位置则采用了  $k$ - $\epsilon$  模型,涡黏系数  $\nu_t$  和  $k$ 、 $\omega$  方程具体表达形式如下:

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (6)$$

式中: $\Omega$ 为涡量; $F_1$ 和 $F_2$ 为混合函数,与点到壁面的距离有关,其中混合函数 $F_1$ 的作用是完成由近壁面的 $k$ - $\omega$ 模型到远离壁面的 $k$ - $\epsilon$ 模型的过渡。

混合函数 $F_1$ 表达式:

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{kw} y^2} \right] \right\}^4 \quad (7)$$

$$CD_{kw} = \max \left( 2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right), \text{混合函数}$$

数 $F_2$ 表达式:

$$F_2 = \tanh \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \quad (8)$$

上述方程中的相关参数: $\sigma_{k1} = 0.85$ ,  $\sigma_{\omega 1} = 0.5$ ,  $\beta_1 = 0.075$ ,  $a_1 = 0.31$ ,  $\beta^* = 0.09$ ,  $\sigma_{\omega 2} = 0.856$ ,以上各参数数据在文献[18]中也有详细说明。

文中使用的螺旋桨前进比、拉力系数、功率系数、巡航效率等与文献[19]中相应的计算公式一致。

螺旋桨前进比:

$$J = \frac{V_\infty}{n_s D} \quad (9)$$

螺旋桨拉力系数:

$$C_T = \frac{T}{\rho n_s^2 D^4} \quad (10)$$

螺旋桨功率系数:

$$C_P = \frac{P}{\rho n_s^3 D^5} \quad (11)$$

螺旋桨巡航效率:

$$\eta = \frac{TV_\infty}{P} \quad (12)$$

螺旋桨悬停效率:

$$\eta' = \frac{T^{3/2}}{P \sqrt{2\rho A}} \quad (13)$$

式中: $V_\infty$ 为来流速度; $n_s$ 为螺旋桨转速; $D$ 为螺旋桨直径; $T$ 为螺旋桨拉力; $P$ 为螺旋桨的功耗。

共轴对转螺旋桨的数值计算采用 Ansys CFX 软件提供的滑移网格方法进行。为验证计算工具和计算方法的适用性,结合本团队前期研究工作,使用该软件和数值方法重新对某三叶变距螺旋桨<sup>[18]</sup>、Graupner E-prop 螺旋桨<sup>[19]</sup>进行数值计算,某三叶变距螺旋桨升力和功率计算值与试验值的比较如图 3 所示。Graupner E-prop 螺旋桨悬停状态下 CFD 与风洞实验的数据<sup>[20]</sup>对比情况如图 4 所示,可以看出:计算结果与实验数据符合良好,验证了计算工具和计算方法的可靠性,对本文后续进行共轴对转螺旋桨的计算奠定了基础。

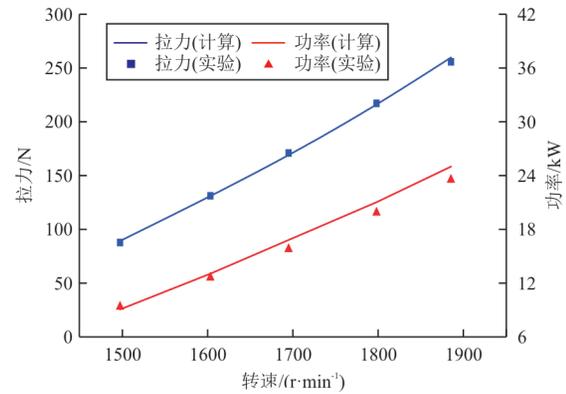


图 3 某三叶变距螺旋桨拉力与功率计算与实验对比  
Fig. 3 Comparison of tension and power between the calculation and experiment

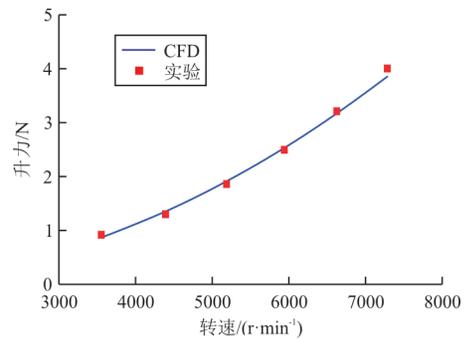


图 4 悬停状态下 Graupner E-prop 升力计算值与实验对比  
Fig. 4 Lift force results of Graupner E-prop between CFD and experiment

### 3 共轴对转桨气动性能计算分析

为了研究后桨桨距角  $\beta_{70,r2}$  对共轴对转桨的气动干扰规律,对来流速度为  $0.453Ma$  的工况进行非定常计算。保证共轴对转螺旋桨前进比不变,改变前桨桨距角,对共轴对转螺旋桨进行气动计算。前桨的效率变化如图 5 所示,根据前桨效率变化,选择前桨桨距角  $\beta_{70,r1} = 54^\circ$ ,对不同后桨桨距角的气动规律进行研究。具体工况数据如表 1 所示,前后桨转速均为  $4\,990.7\text{ r/min}$ ,保证前桨桨距角  $54^\circ$ ,后桨桨距角  $\beta_{70,r2}$  共选取  $50^\circ$ 、 $52^\circ$ 、 $54^\circ$ 、 $56^\circ$ 、 $58^\circ$  和  $60^\circ$  六组进行计算。综合计算效率与计算准确性考虑<sup>[21]</sup>,设置一个旋转周期内迭代 50 步,每个物理时间步螺旋桨转动  $7.2^\circ$ ,每个旋转周期为  $0.012\text{ s}$ ,通过监测拉力、扭矩和残差判断收敛情况,每个工况计算 5 个周期,选取第 5 个周期内的数据进行非定常气动分析。所有非定常计算均在超算平台上完成,采用单节点计算,每个节点包含 64 个 CPU 核心,求解一个旋转周期需要 4 h,压力和流线分布云图如图 6 所示,可以清晰看到吸力面低压区和压力面高压区的分布及螺旋桨附近的流线分布情况。

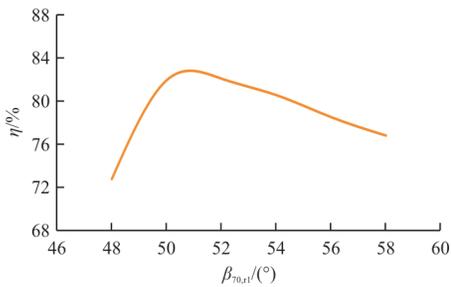
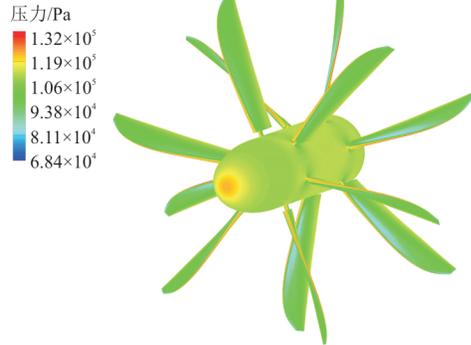


图 5 共轴对转螺旋桨前桨效率随前桨桨距角变化情况  
Fig. 5 The efficiency of the front propeller varies with pitch angle of the front propeller

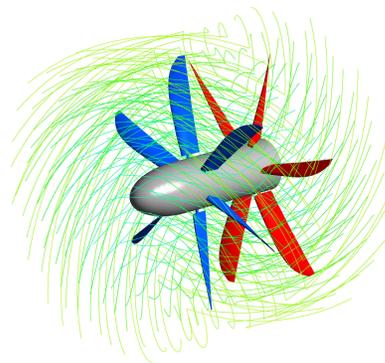
表 1 变后桨距角部分计算工况

Table 1 Calculated working conditions for the variable rear pitch angle section

Ma	Rotor1			Rotor2		
	$J_{r1}$	$\frac{n_{r1}}{(r \cdot \text{min}^{-1})}$	$\beta_{70,r1}/(^{\circ})$	$J_{r2}$	$\frac{n_{r2}}{(r \cdot \text{min}^{-1})}$	$\beta_{70,r2}/(^{\circ})$
0.428	2.5	4 990.7	54	2.5	4 990.7	50
0.428	2.5	4 990.7	54	2.5	4 990.7	52
0.428	2.5	4 990.7	54	2.5	4 990.7	54
0.428	2.5	4 990.7	54	2.5	4 990.7	56
0.428	2.5	4 990.7	54	2.5	4 990.7	58
0.428	2.5	4 990.7	54	2.5	4 990.7	60



(a) 共轴对转螺旋桨压力云图



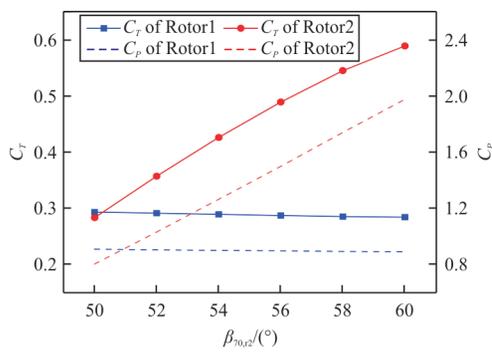
(b) 共轴对转螺旋桨流线分布图

图 6 共轴对转螺旋桨压力和流线分布图  
Fig. 6 The pressure contours and streamline distribution around CRP

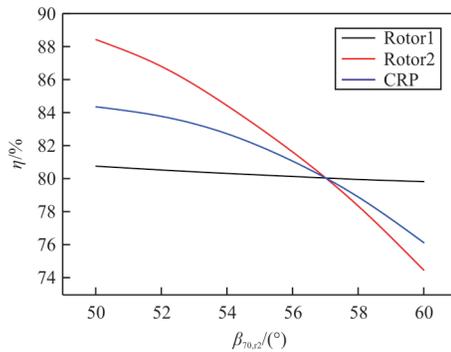
时均化计算数据如表 2 所示,可以看出:当前后桨距角相同时 ( $\beta_{70,r2} = 54^\circ$ ),由于前后桨的旋转使得轴向速度经过两次加速,后桨的拉力系数  $C_T$  为前桨的 1.48 倍,后桨的功率系数  $C_P$  为前桨的 1.4 倍,后桨的效率  $\eta$  比前桨高 4%;与前后桨距角相同相比,减小后桨桨距角  $\beta_{70,r2}$  会对前桨的  $C_T$ 、 $C_P$  和  $\eta$  有小幅提升,后桨的  $C_T$ 、 $C_P$  和  $\eta$  则有较大幅度提升,且在后桨桨距角  $\beta_{70,r2} = 50^\circ$  时,后桨气动效率为 88.38%,提升约 4%;增大  $\beta_{70,r2}$ ,后桨气动效率  $\eta$  逐渐降低,在  $\beta_{70,r2} = 60^\circ$  时,后桨气动效率为 74.50%,降低约 10%。 $C_T$ 、 $C_P$  和  $\eta$  随  $\beta_{70,r2}$  变化情况如图 7 所示,可以看出:以  $\beta_{70,r2} = 54^\circ$  为节点,当  $\beta_{70,r2} < 54^\circ$  时,随着  $\beta_{70,r2}$  增大,后桨  $C_T$  和  $C_P$  线性增大;当  $\beta_{70,r2} > 54^\circ$  时,随着  $\beta_{70,r2}$  增大,后桨的  $C_T$  增大速率明显减小,  $C_P$  依然线性增大,因此后桨的气动效率也明显呈现出加速下降的趋势。

表 2 变后桨距角时均化计算数据  
Table 2 Averaging aerodynamic parameters for the variable rear pitch angle

$\beta_{70,r2}/(^{\circ})$	Rotor1			Rotor2		
	$\bar{C}_T$	$\bar{C}_P$	$\bar{\eta}/\%$	$\bar{C}_T$	$\bar{C}_P$	$\bar{\eta}/\%$
50	0.293	0.908	80.76	0.283	0.802	88.38
52	0.291	0.903	80.53	0.357	1.030	86.76
54	0.289	0.899	80.32	0.426	1.263	84.40
56	0.287	0.896	80.14	0.489	1.498	81.61
58	0.285	0.892	79.96	0.545	1.740	78.36
60	0.284	0.890	79.83	0.589	1.976	74.50



(a) 拉力系数和功率系数随后桨桨距角变化情况

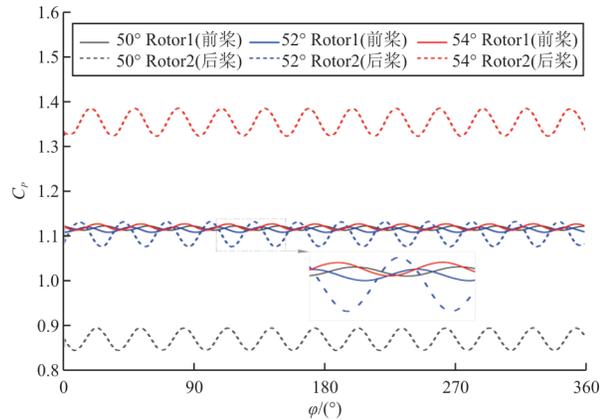


(b) 气动效率随后桨桨距角变化情况

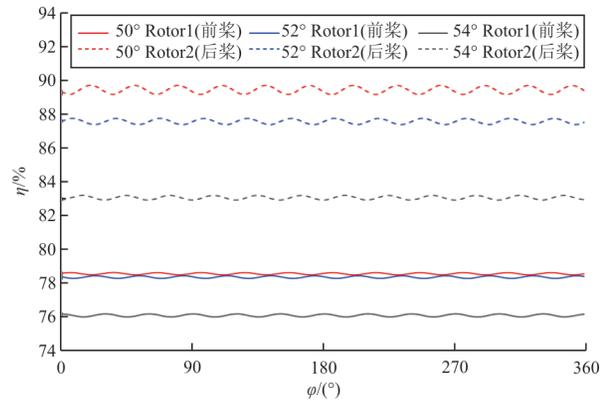
图 7  $\beta_{70,r1} = 54^{\circ}$  时  $C_T$ 、 $C_P$  和  $\eta$  随  $\beta_{70,r2}$  变化情况  
Fig. 7  $C_T$ ,  $C_P$  and  $\eta$  changed with  $\beta_{70,r2}$  when  $\beta_{70,r1} = 54^{\circ}$

为了进一步研究降低后桨桨距角对共轴对转桨气动性能影响情况,在来流马赫数、级间距和转速等计算条件不变的情况下,前桨桨距角  $56^{\circ}$ ,后桨桨距角选取  $50^{\circ}$ 、 $52^{\circ}$  和  $54^{\circ}$  三组进行非定常计算。前后桨和共轴对转桨在一组旋转周期内的气动参数变化情况如图 8 所示,可以看出:一个旋转周期内前桨的功率系数随着后桨桨距角  $\beta_{70,r2}$  增大,前桨  $C_P$  的脉动幅度小幅度增加,说明了后桨桨距角的变化对前桨造成了气动干扰;随着后桨桨距角  $\beta_{70,r2}$  的增加,后桨  $C_P$  的脉动幅度逐渐降低,且后桨

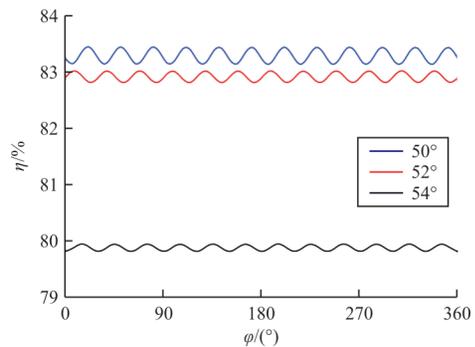
$C_P$  的脉动幅度明显高于前桨,  $\beta_{70,r2}$  为  $50^{\circ}$ 、 $52^{\circ}$  和  $54^{\circ}$  时,后桨功率系数  $C_P$  的脉动幅度分别为前桨的 6.2 倍、4.8 倍和 3.7 倍。当轴向来流吹过共轴对转桨时,前桨产生的桨尖涡会干扰后桨,使其相关气动参数的脉动幅度增强,同样后桨也会影响前桨;数据显示该工况下前桨对后桨扰动影响要大于后桨对前桨的干扰影响。



(a) 不同后桨桨距角下的前后桨功率系数



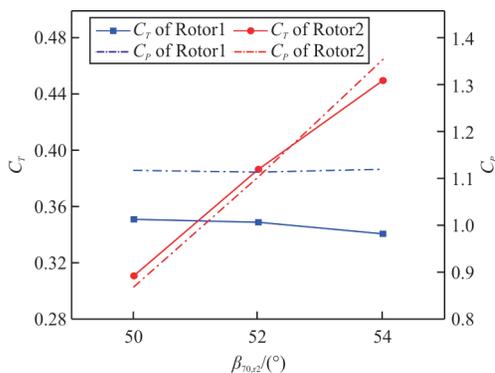
(b) 不同后桨桨距角下的前后桨气动效率



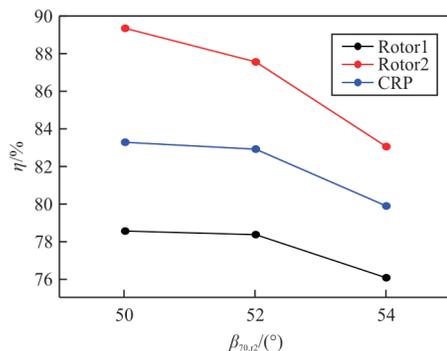
(c) 不同后桨桨距角下的整桨气动效率

图 8  $\beta_{70,r1} = 56^{\circ}$  时共轴对转桨一个旋转周期内气动参数变化  
Fig. 8 The variation of contra-rotating propeller when  $\beta_{70,r1} = 56^{\circ}$

从图8还可以看出: $C_p$ 和 $\eta$ 均在一个旋转周期内出现12次周期性波动。为了更好地分析对转螺旋桨在一个旋转周期内出现周期性的波动,定义桨叶的相位角 $\varphi$ ,前后桨桨叶的相位角分别为 $\varphi_{r1}$ 和 $\varphi_{r2}$ ,桨叶位于竖直方向上时 $\varphi=0^\circ$ 。前桨顺时针旋转,后桨逆时针旋转,由于方向相反,前后桨以相同转速反向旋转时,前桨的桨叶每旋转 $30^\circ$ 便会与后桨的下一片桨叶相遇,从而使得共轴对转桨在一个旋转周期内出现12次周期性波动。前桨桨距角为 $56^\circ$ 时,改变后桨桨距角 $\beta_{70,r2}$ ,前后桨的时均化 $C_T$ 、 $C_P$ 和 $\eta$ 随 $\beta_{70,r2}$ 变化情况如图9所示。



(a) 拉力系数和功率系数随后桨桨距角变化情况



(b) 气动效率随后桨桨距角变化情况

图9  $\beta_{70,r1} = 56^\circ$ 时 $C_T$ 、 $C_P$ 和 $\eta$ 随 $\beta_{70,r2}$ 变化情况

Fig. 9  $C_T$ 、 $C_P$  and  $\eta$  changed with  $\beta_{70,r2}$  when  $\beta_{70,r1} = 56^\circ$

从图9可以看出:当后桨桨距角 $\beta_{70,r2}$ 减小时,后桨的气动效率明显增加,增幅为6%左右。这是由于前后桨转速相同时,后桨受到前桨滑流切向速度的影响,前桨攻角合适的情况下后桨攻角则会偏大。通过数值计算也发现当前后桨距角相同时,后桨的相关气动参数均大于前桨,为了抵消前后桨的扭矩,需要适当地减小后桨桨距角以降低后桨攻角,使其具有更高的气动效率。

## 4 结论

1) 该共轴对转螺旋桨前后桨桨距角相同时,由于前后桨的旋转使得轴向来流速度经过两次加速,后桨的相关气动参数均大于前桨。改变后桨桨距角,前后桨气动参数均会变化,且后桨相关气动参数脉动变化幅度明显高于前桨,后桨对前桨的扰动影响小于前桨对后桨造成的气动干扰。

2) 在前桨桨距角为 $54^\circ$ 和 $56^\circ$ 工况下,减小后桨桨距角,前桨效率有小幅提升,后桨拉力系数和功率系数则有较大幅度提升,后桨效率分别提升了4%和6.4%,并且后桨拉力系数、功率系数、气动效率的脉动幅度增大。在前桨桨距角为 $54^\circ$ 和 $56^\circ$ 的工况下应适当减小后桨桨距角。

## 参考文献

- [1] 朱大明. 桨扇浮沉——回顾美国20世纪70—80年代桨扇发动机研发历程[J]. 航空世界, 2014(6): 40-45.  
ZHU Daming. Paddle fan floating review of the United States in the 1970s and 1980s paddle fan engine development history[J]. Aviation World, 2014(6): 40-45. (in Chinese)
- [2] 严成忠. 绿色动力: 开式转子航空发动机[J]. 航空科学技术, 2013(1): 6-12.  
YAN Chengzhong. Green power: open rotor aero-engine [J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(1): 6-12. (in Chinese)
- [3] 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)
- [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] 王轩. 开式转子发动机设计与应用浅析[J]. 电子测试, 2016(10): 18-19.  
WANG Xuan. Analysis on design and application of open rotor engine [J]. Electronic Test, 2016(10): 18-19. (in Chinese)
- [6] 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.  
LIU Peiqing. Air propeller theory and its application [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 康瑞元, 陈玉春, 蔡飞超, 等. 齿轮传动对转桨扇发动机总体性能建模[J]. 推进技术, 2019, 40(11): 2428-2435.

- KANG Ruiyuan, CHEN Yuchun, CAI Feichao, et al. Performance modelling of geared contra-rotating propfan engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40 (11) : 2428-2435. (in Chinese)
- [8] STUERMER A. Validation of an unstructured chimera grid approach for the simulation of propeller flows: AIAA-2004-5289[R]. Providence, Rhode Island: AIAA, 2004.
- [9] STUERMER A. Unsteady CFD simulations of contra-rotating propeller propulsion systems[C]// The 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Hartford: AIAA, 2008: 1-7.
- [10] CHAITANYA P, JOSEPH P, PRIOR S D, et al. On the optimum separation distance for minimum noise of contra-rotating rotors [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 535: 117032.
- [11] SMITH D A, FILIPPONE A, BOJDO N. Noise reduction of a counter rotating open rotor through a locked blade row [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 98(C) : 1-8.
- [12] FRANCOIS B, LABAN M, COSTES M, et al. In-plane forces prediction and analysis in high-speed conditions on a contra-rotating open rotor [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 136(8) : 081002.
- [13] 崔盼望, 仝帆, 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)
- [14] 邵伟平, 何敏桃, 郝永平. 悬停状态共轴双旋翼桨叶扭转气动特性 [J]. *航空动力学报*, 2014, 29(11) : 2606-2612.
- SHAO Weiping, HE Mintao, HAO Yongping. Blade-twist aerodynamic characteristics of coaxial rotors in hover [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29 (11) : 2606-2612. (in Chinese)
- [15] 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 Changhao, HU Tianxiang, SUN Tao, et al. Low noise counter rotating propellers design based on BWI radiation efficiency [J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2022 (1) : 83-89. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 卢丛玲, 史勇杰, 徐国华, 等. 共轴刚性旋翼悬停状态气动干扰机理 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(2) : 201-207.
- LU Congling, SHI Yongjie, XU Guohua, et al. Research on aerodynamic interaction mechanism of rigid coaxial rotor in hover [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(2) : 201-207. (in Chinese)
- [18] 闫文辉, 汤斯佳, 王奉明, 等. 共轴对转螺旋桨的非定常气动干扰 [J]. *航空动力学报*, 2021, 36(7) : 1398-1405.
- YAN Wenhui, TANG Sijia, WANG Fengming, et al. Unsteady aerodynamic interactions of contra rotating propeller [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36 (7) : 1398-1405. (in Chinese)
- [19] 闫文辉, 王雪晨, 周军伟, 等. 旋翼螺旋桨/机翼巡航状态气动干扰规律研究 [J]. *推进技术*, 2021, 42(2) : 290-297.
- YAN Wenhui, WANG Xuechen, ZHOU Junwei, et al. Aerodynamic interaction between rotor propeller and wing in cruise state [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42 (2) : 290-297. (in Chinese)
- [20] KHAN W, NAHON M. A propeller model for general forward flight condition [J]. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 2015, 3(2) : 72-92.
- [21] 韦炜, 韩庆, 桑晓庆, 等. 计入螺旋桨干扰的倾转机翼飞行器气动特性研究 [J]. *航空工程进展*, 2019, 10(4) : 521-527.
- WEI Wei, HAN Qing, SANG Xiaoqing, et al. Study on aerodynamic characteristics of tilting wing aircraft considering propeller interference [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(4) : 521-527. (in Chinese)

#### 作者简介:

孙召政(2001—),男,硕士研究生。主要研究方向:计算流体力学。

闫文辉(1979—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:航空螺旋桨推进技术等。

曹德松(1992—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空螺旋桨技术。

(编辑:丛艳娟)