

文章编号: 1000-8055(2023)03-0709-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220464

桨间距对某型共轴对转螺旋桨气动性能的影响

汤斯佳¹, 曹德松¹, 闫文辉², 王雪晨², 邓佳子²

(1. 中国航空工业集团有限公司 惠阳航空螺旋桨有限责任公司, 河北 保定 071051;

2. 北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘 要: 为掌握共轴对转螺旋桨的桨间气动干扰规律, 降低桨间气动干扰强度, 提升共轴对转螺旋桨的气动性能, 基于非定常雷诺平均 Navier-Stokes 方程耦合湍流模型的计算方法, 并使用了滑移网格技术, 研究了 4 种不同桨间距的 6×6 构型对转螺旋桨的桨间气动干扰对其气动性能的影响, 桨间距选择了 4 种不同方案。研究表明: 在 4 种不同的轴向桨间距中, 当桨间距为 0.25 倍螺旋桨直径时, 共轴对转螺旋桨的平均推进效率最高, 并且气动干扰导致的效率脉动幅度较小; 随着桨间距的增大, 前、后排桨受到的气动干扰强度都会减小, 相比于后桨, 前桨因气动干扰造成的脉动对桨间距更加敏感。可见共轴对转螺旋桨的桨间距会对螺旋桨的气动干扰, 及气动性能产生较为明显的影响, 在设计共轴对转螺旋桨时选择合适的桨间距, 有利于提高螺旋桨气动性能。

关 键 词: 共轴对转螺旋桨; 桨间距; 推进效率; 气动性能; 滑移网格

中图分类号: V275

文献标志码: A

Stage spacing on aerodynamic performance of a certain type of coaxial contra rotating propeller

TANG Sijia¹, CAO Desong¹, YAN Wenhui², WANG Xuechen², DENG Jiazi²

(1. Huiyang Aviation Propeller Company, Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Limited, Baoding Hebei 071051, China;

2. School of Mechanical and Materials Engineering,

North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: In order to master the law of aerodynamic interaction between stages of coaxial contra rotating propeller, reduce the intensity of aerodynamic interference between propellers and improve the aerodynamic performance of coaxial contra rotating propeller, the effects of 4 stage spaces between front and rear rows of 6×6 contra rotating propeller on aerodynamic interference were studied based on Reynolds averaged unsteady Navier-Stokes equation method and sliding mesh technique. The results showed that: the average propulsion efficiency of the coaxial contra rotating propeller was the highest when the stage spacing was 0.25 times of the propeller diameter. In addition, the efficiency fluctuation caused by aerodynamic interference was smaller. With the increase of stage spacing, the intensity of aerodynamic interference of front and rear propellers decreased. Compared with the rear propeller, the thrust pulsation of front propeller caused by aerodynamic interference was more sensitive to stage spacing. It can be seen that the stage spacing of coaxial contra rotating propeller had an obvious impact on the

收稿日期: 2022-06-28

基金项目: 先进航空发动机创新工作站项目(HKXC2020-02-024); 装发预研航空动力基金(6141B09050397)

作者简介: 汤斯佳(1984—), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事螺旋桨技术研究。

通信作者: 闫文辉(1979—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事航空推进技术、湍流模型研究。E-mail: abuaa@163.com

引用格式: 汤斯佳, 曹德松, 闫文辉, 等. 桨间距对某型共轴对转螺旋桨气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2023, 38(3): 709-716. TANG Sijia, CAO Desong, YAN Wenhui, et al. Stage spacing on aerodynamic performance of a certain type of coaxial contra rotating propeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(3): 709-716.

aerodynamic interference of propellers. Appropriate stage spacing in the design of coaxial contra rotating propeller is important to improve the aerodynamic performance of contra rotating propeller.

Keywords: coaxial contra rotating propeller; stage spacing; propulsion efficiency; aerodynamic performance; sliding mesh

螺旋桨飞机由于具有单位耗油率低、经济性好、污染排放少的优点,对促进绿色航空的发展起着重要的作用。因共轴对转螺旋桨(contra rotating propeller, CRP)可以进一步提高推进效率,但有噪声过大的缺点,得到了国内外的广泛关注^[1-3]。国际上研究机构在这方面做出了很多努力和尝试,比如汉密尔顿公司设计的 CRP-X1 和 CR11, NASA 与 GE 联合研制的 GE36, 空客与赛峰等联合设计的 AI-PX7, 俄罗斯 Aerosila 公司研制的 SV-27、SV92 都是典型的代表,取得了很多成功的经验。研究发现,共轴对转螺旋桨的推进效率更高,对比常规的涡扇发动机,燃油消耗可减少 30% 以上。因此,欧美发达国家再次将共轴对转螺旋桨发动机列为新一代航空发动机的备选构型之一,并且随着近年来气动噪声学科的发展,降噪技术有了较快进步,有望克服共轴对转螺旋桨突出的噪声问题,实现共轴对转螺旋桨较好的推广和应用。

在共轴对转螺旋桨气动设计中,前、后双排桨的桨叶角度,前、后桨盘的直径,以及前、后桨的轴向距离(桨间距)都会对前后排桨的气动干扰造成重要影响,从而导致共轴对转螺旋桨的气动效率、疲劳特性,以及气动噪声产生显著变化。因此,设计高效率、低噪声的共轴对转螺旋桨必须要解决好前后排桨之间的气动干扰问题。国际上在这方面做了一些研究,利用先进的对转桨设计技术,可以在巡航马赫数为 0.70 的情况下,使共轴对转桨的推进效率超过 85.0%^[4]。

国内外研究者在对转桨的气动干扰方面也做了一些有意义的设计、仿真和实验验证。文献[5]计算了 6×6 构型的共轴对转螺旋桨的气动干扰流场,并研究了单个螺旋桨桨叶的受力情况。指出前、后排桨叶对转产生了明显的周期性非定常气动干扰,并使后桨 70% 半径位置上的轴向气流速度出现了显著脉动。文献[6]使用浸入式贴体网格方法,计算了 8×6 构型的对转桨扇非定常流场。指出前桨叶的桨尖涡及桨叶尾缘诱导涡对后桨的非定常气动干扰强烈,而且后排桨的前伸激波也会前排桨的通道流场产生强烈的扰动,由此造

成的相互影响会对桨扇功率和推力产生超过设计值 10% 的误差。由于在起飞或者巡航条件下,螺旋桨桨叶的变形会对其气动性能和噪声水平产生明显的影响,文献[7]研究中指出前排桨叶的变形量大于后排桨叶的变形量,但是后排桨叶性能变化显著大于前桨的性能变化。文献[8]使用非定常雷诺平均 Navier-Stocks 方程(unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes, URANS)的数值模拟方法,研究了共轴对转螺旋桨的桨间气动干扰问题,发现前、后排桨尖涡的相互作用导致了严重的非定常气动干扰,后排桨可以吸收前排桨的滑流能量,并降低了前排螺旋桨的桨尖涡强度。文献[9]也使用基于 URANS 方程耦合湍流模型方法的 DLR-TAU 程序,进行了共轴对转桨扇的非定常流场数值计算,比较了不同来流条件下的计算结果,分析桨间复杂的气动相互作用,指出在轴向来流条件下,比较有利于桨扇提高气动性能。文献[10]在国内外对转桨扇的气动特性高精度计算、精细化非定常流场仿真、桨间气动干扰效应等方面进行了详细的综述,指出目前国内在高气动性能以及低噪声的共轴对转桨扇设计方面还有很多工作要做。文献[11]采用动态面搭接技术,对 10×10 对转开式转子构型进行了非定常气动数值模拟。数值计算发现,后转子的拉力系数和功率系数大于前转子,并且前、后排桨尖涡的周期性相互作用引起了桨叶的非定常受力变化。文献[12]在基于 S_2 流面的压气机设计经验基础上,参考 NASA F7-A7 对转桨扇性能参数,设计了一款共轴对转桨扇模型,并基于计算流体力学方法(computational fluid dynamics, CFD)进行了计算和分析,初步验证了气动设计的有效性。文献[13]基于雷诺平均 Navier-Stocks 方程和 SST(shear stress transport)湍流模型,在多重参考系下,计算了平流层飞艇上的对转螺旋桨的推进特性,指出对转螺旋桨效率较单桨提高了 13.3%,而综合扭矩仅为单桨的 4.8%,说明了共轴对转螺旋桨在高效率和低扭矩的优势和发展潜力。文献[14]使用了气动载荷快速预测方法和气动噪声快速预测理论对共轴对转螺旋桨的性能和噪声进行预测。

分析了低桨叶数与高桨叶数气动噪声特性的不同点, 指出不等桨叶数普遍优于等桨叶数情况下的噪声, 并给出了总桨叶数相同情况下, 前后桨叶数的搭配方案。

桨间距是影响共轴对转螺旋桨性能的一个重要因素, 特别是对前、后排桨气动干扰造成的周期性脉动规律方面有明显的影响, 进而会造成桨叶气动力载荷和推进效率的振荡。以往文献在这个方面的研究较少, 还没有较为细致的论述。本文基于 URANS 耦合湍流模型的方法, 并使用滑移网格计算技术, 在网格无关性研究基础上, 计算了 4 种不同桨间距的 6×6 构型共轴对转螺旋桨非定常气动干扰流场。通过数值计算, 获得了共轴对转桨的推进效率 η 、拉力系数 C_T 、功率系数 C_P 等随着共轴对转螺旋桨桨间距的变化规律。在该 6×6 构型和前进比下, 确定了比较合适的桨间距, 既保证了较好的整桨推进效率, 又尽量降低共轴对转螺旋桨前、后排桨产生的气动干扰导致的性能参数的脉动幅度, 以期对共轴对转螺旋桨的设计和实验提供一定参考。

1 数值模拟方法

1.1 流动控制方程

基于 URANS 方程组的湍流模型方法, 尽量兼顾考虑了工程实际问题中, 数值计算要求的快速、准确、经济的特点, 依然是目前计算共轴对转螺旋桨非定常气动干扰问题的主要 CFD 方法之一。

当不考虑外加热源和质量力时, 积分形式的非定常 Navier-Stokes 方程组可写成如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \mathbf{Q} d\Omega + \iint_{\partial\Omega} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

式中 $\mathbf{Q}$ 为守恒变量, 包含密度 ρ 、三维笛卡儿直角坐标系下的速度分量 u 、 v 、 w 和总能量 e ; S 表示 Ω 的边界; 方程中, t 表示时间; $\partial\Omega$ 为某一指定区域 Ω 的边界; $\mathbf{n}$ 为边界的外法线方向单位向量; 矢通量 $\mathbf{F}$ 包括对流矢通量和黏性矢通量两部分。为了封闭雷诺平均后的方程, 湍流模型使用 SST 模型^[15]。

式(2)~式(5)列出了共轴对转螺旋桨气动性能计算用到的主要公式, 具体形式如下:

螺旋桨前进比 J

$$J = v / (nD) \quad (2)$$

螺旋桨推进效率 η

$$\eta = Fv/P \quad (3)$$

螺旋桨拉力系数 C_T

$$C_T = F / (\rho n^2 D^4) \quad (4)$$

螺旋桨功率系数 C_P

$$C_P = P / (\rho n^3 D^5) \quad (5)$$

式中 v 表示螺旋桨的飞行速度; n 表示螺旋桨每秒钟的旋转圈数; D 表示螺旋桨直径; F 表示螺旋桨产生的拉力; P 表示螺旋桨消耗的功率。

1.2 数值计算方法

由于共轴对转螺旋桨前后排桨叶之间存在强烈的非定常气动干扰, 需要在数值计算中使用非定常计算方法, 本文采用 Ansys CFX 的滑移网格方法进行桨间气动干扰流场的计算。具体方法为: 把包含前排桨和后排桨的计算域分开, 并分别设置不同的旋转角速度。另外, 在包含螺旋桨的旋转区域外部设置不旋转的固定区域。在前、后排桨的对转交界面, 以及旋转区域与非旋转的固定区域之间的交界面, 进行数据插值和信息交互。选用的方式为瞬态转-静(transient rotor-stator)的设置方法。数值计算中, 空间离散格式均采用高阶精度格式(high resolution)。将共轴对转螺旋桨的定常计算结果作为非定常计算的初值, 非定常计算的时间步长设置为螺旋桨转过 1°对应的物理时长, 从而保证共轴对转螺旋桨非定常计算的时间精度要求。使用 PointWise 软件对共轴对转桨的网格进行划分, 采用了 T-Rex(anisotropic tetrahedral extrusion)网格自动生成技术, 快速、高效地进行了高质量计算网格的生成。为了保证对边界层内黏性流动的分辨率, 通过调整第 1 层网格距物面(桨叶、桨毂)法向间距, 来保证 Y^+ 小于 1.0。

1.3 计算方法验证

为了检验本文使用的计算方法的准确可靠性, 在计算共轴对转桨非定常气动干扰流场之前, 首先计算了 1 个两叶定距螺旋桨 Graupner E-prop^[16-17] 在来流夹角 α 为 30°和 60°情况下的流场。该条件下的流场属于 1 个典型的非定常流动状态。该状态下流场具有实验值, 便于计算方法的验证。实验的条件为: 高度为海平面高度, 螺旋桨转速为 7 500 r/min, 来流速度为 9 m/s。由于螺旋桨的来流是与轴向有一定的夹角, 因此该流动是 1 个

典型的非定常流动, 计算中使用滑移网格方法, 即包含螺旋桨的旋转区域与外围的非旋转区域使用 transient rotor-stator 方式进行设置。图 1 中显示了数值计算得到的 30° 来流夹角和 60° 来流夹角的流线分布情况, 可以看出不同的来流速度经过螺旋桨后有明显的方向改变。图 2 中对比了螺旋桨拉力系数 C_T , 以及功率系数 C_P 的计算与实验情况。通过对比, 可以看出基于 URANS 的滑移网格方法^[18-19]能够较准确地获得螺旋桨的气动性能, 并能够合理计算出螺旋桨的非定常滑流现象。因此, 该方法适用于共轴对转螺旋桨桨间非定常气动干扰的计算分析。另外, 在文献[5]中对某三叶变距单排螺旋桨进行了数值计算, 使用

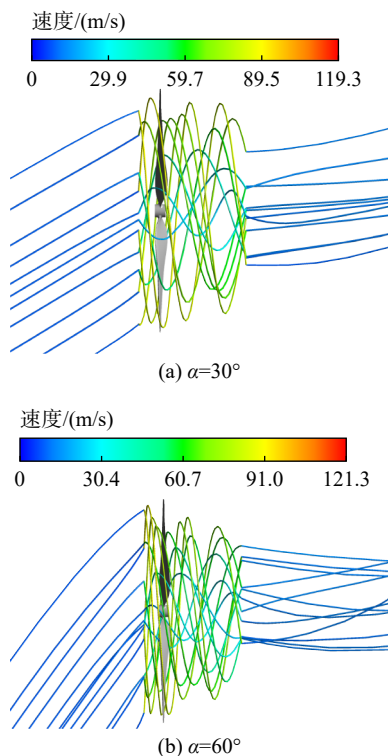


图 1 不同角度来流下流线图

Fig. 1 Streamlines at different inflow angles

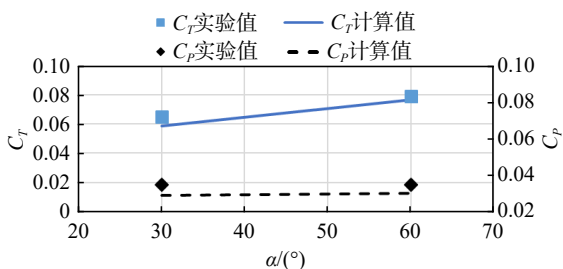


图 2 拉力系数和功率系数的计算值与实验数据对比

Fig. 2 Comparison of thrust coefficient and power coefficient between the calculation and experiment

了与本文同样的计算方法, 计算结果与实验数据符合很好, 在前进比为 2.5~3.1 的区间, 螺旋桨拉力系数 C_T 的最大计算误差不超过 2%, 说明了本文使用计算方法的准确可靠性较好, 对后续计算获得的共轴对转桨结果的可信度较高。

2 计算结果分析

图 3 为本文计算的共轴对转螺旋桨几何模型, 前、后排桨叶均为 6 片, 4 组不同的前后排桨叶间的距离 δ 分别为 $0.20D$ 、 $0.25D$ 、 $0.30D$ 和 $0.35D$ 。在该共轴对转螺旋桨的数值计算中, 来流马赫数为 0.428, 前进比为 2.5, 前、后排桨距角都为 52° , 前、后排桨旋转速度相同, 旋转方向相反。为了验证网格无关性, 计算中使用了 100 万、140 万、240 万、340 万、420 万、580 万、680 万网格, 先对 $\delta=0.20D$ 构型下的共轴对转桨流场进行了计算。图 4 显示了不同网格下, 前、后桨的平均推进效率的变化情况。可以看出, 当网格数量超过 400 万时, 螺旋桨的推进效率基本稳定了, 说明 400 万的网格基本达到了网格无关性要求, 在后续计算中都使用 580 万的网格。

图 5 是在桨间距为 $0.35D$ 情况时, 两个不同时刻下计算得到的涡量图, 图中可以看出前、后

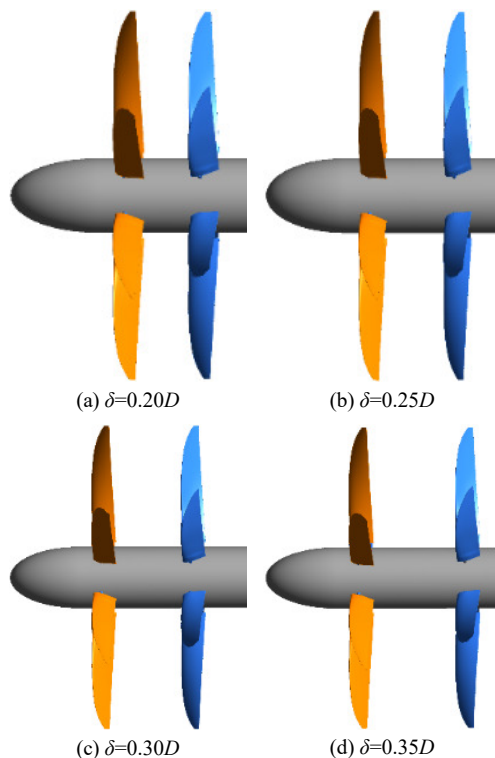
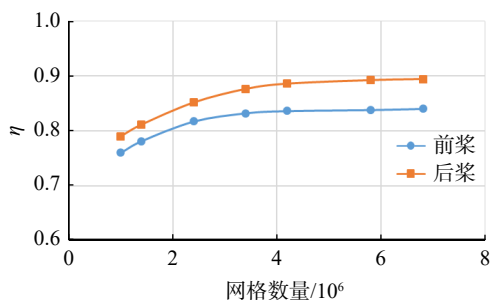
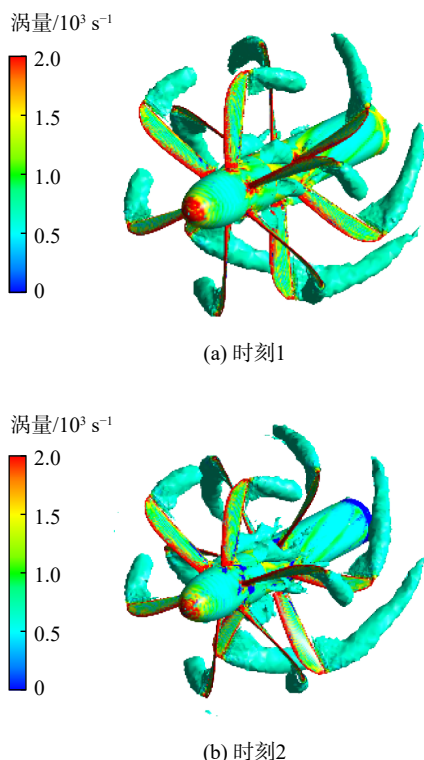


图 3 不同桨间距的共轴对转螺旋桨示意图

Fig. 3 Coaxial contra rotating propeller with different stage spacings

图4 不同网格数量下推进效率变化($\delta=0.2D$)Fig. 4 Propulsion efficiency with different meshes ($\delta=0.2D$)图5 不同时刻下共轴对转桨涡量分布云图($\delta=0.35D$)Fig. 5 Vorticity distribution of coaxial contra rotating propeller at different times ($\delta=0.35D$)

排对转桨叶产生的桨尖涡的发展形态, 旋转方向相反。图6为螺旋桨在4种不同桨间距下, 平均推进效率的变化趋势, 可以看到桨间距对螺旋桨的推进效率有比较明显的影响, 在这4组桨间距中存在一个最优的桨间距, 即 $0.25D$ 的桨间距, 当桨间距过小或者过大时, 共轴对转螺旋桨的效率都会下降。在本文计算的4种桨间距中, 整桨效率的变化约有2%, 并且, 在 $0.25D$ 下的效率最高, 整桨的效率超过了87%, 共轴对转桨此时处在比较理想的工况下运行。

为了进一步研究桨间距对前、后排桨叶气动力非定常干扰的影响, 图7中给出了一个旋转周

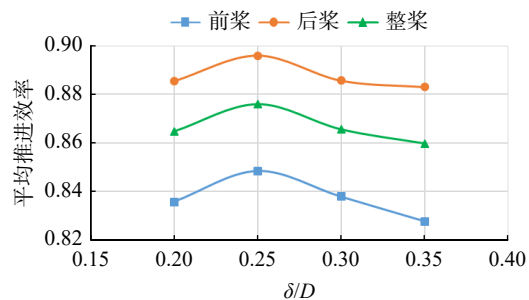


图6 共轴对转桨平均推进效率随着桨间距的变化

Fig. 6 Variation of averaged propulsion efficiency of coaxial contra rotating propeller with stage spacing

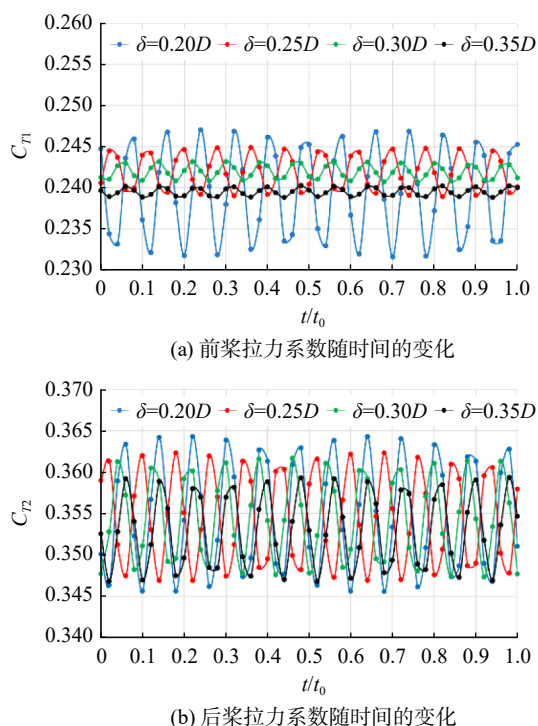


图7 共轴对转螺旋桨拉力系数随时间的变化情况

Fig. 7 Variation of thrust coefficient of coaxial contra rotating propeller with time

期内, 4种桨间距下, 前、后排桨的瞬时拉力系数 C_T 随无量纲时间的变化情况。图中横坐标为无量纲时间——螺旋桨旋转时的瞬态时间 t 与上一个旋转周期时长 t_0 的比值, 纵坐标为螺旋桨的瞬态拉力系数 C_{T1} 和 C_{T2} 。可以发现, 随着桨间距的增大, 前排桨和后排桨的拉力系数脉动量都在减小。相比后桨, 前排桨的气动力载荷脉动幅值的变化非常明显, 前排桨在桨间距为 $0.20D$ 时的脉动幅值是 $0.35D$ 时的10倍左右, 而后排桨在桨间距为 $0.20D$ 时的脉动幅值是 $0.35D$ 时的1.5倍左右。这说明前排桨因气动干扰造成的脉动对桨间距更加敏感。图8中给出了共轴对转螺旋桨前、后排桨的拉力

系数和功率系数的最大脉动百分比随着桨间距的变化情况。从图中更清楚地看出前、后桨的气动干扰造成的脉动量随着桨间距增大而减小,前排桨减小的趋势更快。在 $0.22D$ 的桨间距附近,前排桨和后排桨的脉动幅度基本一致,当桨间距小于 $0.22D$ 时,前排桨的脉动幅度大于后桨;当桨间距大于 $0.22D$ 时,后排桨的脉动幅度大于前排桨。这与图 7 中反映的情况是一致的,在分析桨间气动干扰对前、后桨的影响时,要考虑桨间距的大小的因素,再确定前排桨受到的气动干扰大,还是后排桨受到的气动干扰大。

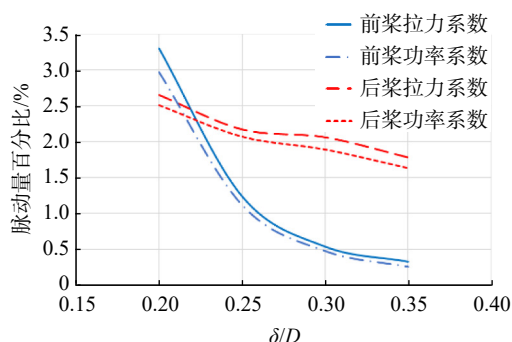


图 8 拉力系数和功率系数的脉动幅值随桨间距变化

Fig. 8 Variation of fluctuation of thrust coefficient and power coefficient with stage spacing

图 9 为共轴对转螺旋桨的前桨、后桨和整桨的瞬态效率在一个旋转周期内随时间的变化,可以看到,前、后桨及整桨的效率都存在正弦波式脉动,随着桨间距的增大,前桨效率的脉动逐渐减小,而后桨和整桨的脉动量变化并不明显。另外,也可以看到,整桨效率一直是介于前桨和后桨之间,后桨由于吸收了前桨的切向滑流能量,效率最高。因此,在设计共轴对转桨时,首先要充分提高前桨性能,以便获得综合性能更好的整桨。图 10 进一步显示了效率脉动量占其平均值的百分比。可以看到整桨的效率脉动都比较小,在 0.1% 左右,并且在桨间距为 $0.25D$ 时脉动量最小,仅为 0.06% 。从图 10 中还可以发现,前排桨受到的桨间气动干扰对桨间距更加敏感,特别是当桨间距较小时,由于后排桨压力扰动前传给前桨,导致了前桨受到气动干扰较大,当桨间距加大后,前桨受到的干扰迅速减小。

加大桨间距会减小桨间气动干扰的不利影响,但过大的桨间距会导致后桨不易吸收前桨的滑流能量,导致整桨气动性能的降低。通过对 4 种不

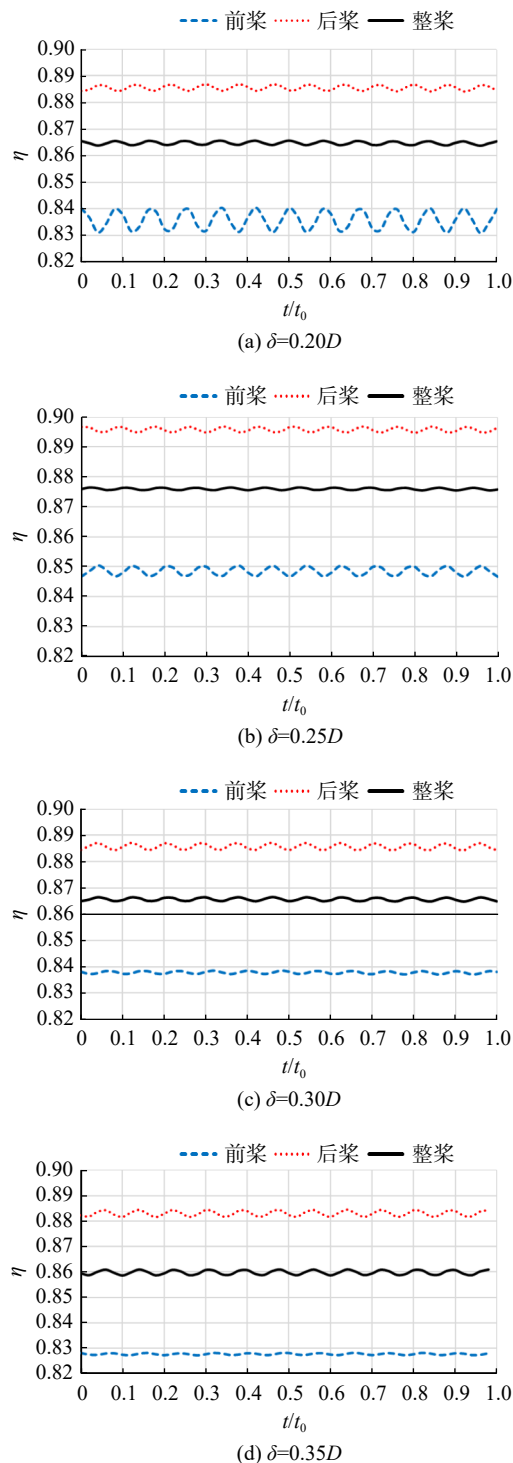


图 9 不同桨间距下瞬时推进效率随时间变化

Fig. 9 Variation of instantaneous propulsion efficiency of contra rotating propeller with time under different stage spacing

同桨间距的共轴对转桨平均效率高低的比较,以及气动干扰导致的非定常脉动幅值的比较,发现 $0.25D$ 的桨间距是最理想的,既保证了较高的整桨推进效率,又使得整桨的气动干扰保持在相对较低的水平上。

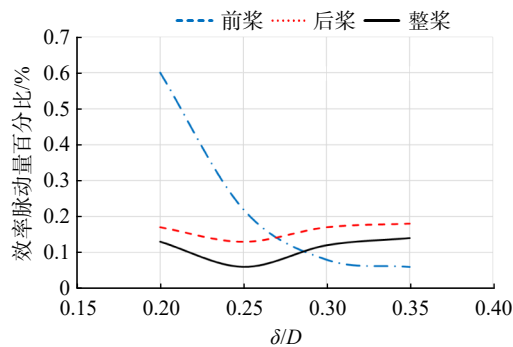


图10 效率脉动量随桨间距的变化

Fig. 10 Variation of fluctuations of efficiency with stage spacing

3 结 论

本文使用 URANS 方程耦合湍流模型方法和滑移网格技术,对4种不同桨间距的共轴对转螺旋桨非定常流场进行了数值计算,分析桨间距对螺旋桨气动性能的影响规律,可以得到如下结论:

1) 在网格无关性验证的基础上,本文使用的计算方法能够合理准确地计算共轴对转螺旋桨的桨间气动干扰流场,并获得不同桨间距下的螺旋桨的非定常气动性能数据。

2) 随着桨间距的增大,前排桨和后排桨的拉力系数脉动量、功率系数脉动量都减小。而且桨间距造成的气动干扰对前排桨的非定常脉动影响更显著。

3) 在4种不同的桨间距中,0.25D桨间距构型的共轴对转螺旋桨的平均推进效率最高,并且气动干扰导致的整桨的推进效率脉动幅度最小,仅为0.06%。因此,在4种桨间距中,0.25D的桨间距是最好的。

4) 当桨间距小于0.22D时,气动干扰导致的前桨拉力系数脉动超过后桨;当桨间距大于0.22D时,气动干扰导致的后桨拉力系数脉动超过前桨。因此,在研究桨间气动干扰时,需要考虑不同桨间距对前后排桨造成的不同影响。

参考文献:

- [1] BREHM C, BARAD M F, KIRIS C C. Development of immersed boundary computational aeroacoustic prediction capabilities for open-rotor noise[J]. *Journal of Computational Physics*, 2019, 388(1): 690-716.
- [2] EBUS T, DIETZ M, HUPFER A. Experimental and numerical studies on small contra-rotating electrical ducted fan engines[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2021, 12: 559-571.
- [3] TANG J, WANG X, DUAN D, et al. Optimisation and analysis of efficiency for contra-rotating propellers for high-altitude airships[J].

Aeronautical Journal, 2019, 123(1263): 706-726.

- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 王靖元, 单鹏, 周亦成. 浸入式贴体网格边界方法的对转桨扇非定常流动数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(5): 1060-1071.
WANG Jingyuan, SHAN Peng, ZHOU Yicheng. Unsteady flow simulation of contra-rotating propfans using immersed body-fitted grids boundary method[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(5): 1060-1071. (in Chinese)
- [7] FLISSARD F, BOISARD R, GAVERIAUX R, et al. Influence of blade deformations on open-rotor low-speed and high-speed aerodynamics and aeroacoustics[J]. *Journal of Aircraft*, 2018, 55(6): 2267-2281.
- [8] SHI W, LI J, YANG Z, et al. CFD analysis of contrarotating open rotor aerodynamic interactions[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 2018: 1-13.
- [9] STUERMER A. Validation of an unstructured chimera grid approach for the simulation of propeller flows[R]. AIAA 2004-5289, 2004.
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 周人治, 郝玉扬, 祁宏斌. 开式转子发动机对转桨扇设计[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2014, 27(1): 1-5.
ZHOU Renzhi, HAO Yuyang, QI Hongbin. Open rotor contra rotating prop-fan design[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2014, 27(1): 1-5. (in Chinese)
- [13] 张宇, 王晓亮, 马影. 平流层飞艇对转螺旋桨推进性能研究[J]. *大连理工大学学报*, 2020, 60(3): 221-227.
ZHANG Yu, WANG Xiaoliang, MA Ying. Study of propulsion performance of contra-rotating propellers for stratospheric airship[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2020, 60(3): 221-227. (in Chinese)
- [14] 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, 144(1): 83-89.
LÜ Changhao, HU Tianxiang, SUN Tao, et al. Low noise counter rotating propellers design based on BWI radiation efficiency[J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2022, 144(1): 83-89. (in Chinese)

- [15] MENTER F, RUMSEY C. Assessment of two-equation turbulence models for transonic flows[R]. AIAA 94-2343, 1994.
- [16] KHAN W, NAHON M. A propeller model for general forward flight conditions[J]. International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2015, 3(2): 72-92.
- [17] THEYS B, DIMITIADIS G, ANDRIANNE T, et al. Wind tunnel testing of a VTOL MAV propeller in tilted operating mode[C]// International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Orlando, FL, US: IEEE, 2014: 23-30.
- [18] 林沐阳, 招启军, 赵国庆. 基于滑移网格的倾转旋翼机全机干扰流场研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 100-108.
- LIN Muyang, ZHAO Qijun, ZHAO Guoqing. Research on the whole aircraft interference flow field of tilt-rotor aircraft based on sliding grid[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 100-108. (in Chinese)
- [19] 高飞飞. 螺旋桨滑流非定常数值模拟与影响研究[J]. 航空计算技术, 2017, 47(5): 14-17.
- GAO Feifei. Numerical simulation of unsteady and research on effect of propeller slipstream[J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(5): 14-17. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)