

桨尖间隙和双桨间距对涵道螺旋桨 气动性能的影响

苏运德, 叶正寅, 许和勇

(西北工业大学 航空学院 翼型叶栅空气动力学国防科技重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 采用基于非结构网格的滑移网格技术,对悬停状态下涵道螺旋桨流场进行了非定常 Euler 方程数值模拟,分别考查了桨尖间隙和双桨间距对涵道螺旋桨气动性能的影响.桨尖间隙比的变化范围取为 $0 \sim 1.37\%$,双桨间距变化范围取为 $0.25 \sim 0.65$ 倍的桨叶半径.研究发现:随着桨尖间隙增大,涵道螺旋桨拉力降低,功率载荷减小;桨尖间隙比存在一个临界值,约为 1.10% ,在该值附近,桨尖泄漏涡显著增强,引起涵道和螺旋桨的拉力分配关系剧烈变化,涵道拉力占总拉力的比值下降 10.27% ,系统气动性能迅速恶化;大间隙下桨尖泄漏流表现出较强的非定常现象.增大双桨间距可以提高共轴双桨涵道的气动效率,但是因为涵道对螺旋桨滑流的改善作用,这种影响并不显著,气动力的相对变化量在 3% 以内.

关 键 词: 涵道螺旋桨; 共轴双桨涵道; 气动性能; 桨尖间隙; 双桨间距; 非定常模拟

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Influence of tip clearance and propeller separation space on aerodynamic performance of ducted propeller

SU Yun-de, YE Zheng-yin, XU He-yong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research,
School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The aerodynamics of flow field around the ducted propeller system in hover was simulated to investigate the influence of tip clearance and propeller separation space on aerodynamic performance individually around the unsteady Euler equations with unstructured sliding mesh technique. The tip clearance ratio varied between 0 and 1.37% , and the propeller separation space range was $0.25 \sim 0.65$ times of propeller radius. The investigation shows that increasing tip clearance leads to decrease in total thrust and power loading of ducted propeller. The critical tip clearance ratio is about 1.10% . The magnitude of leakage vortices increases dramatically at the critical tip clearance, causing significant change of the thrust sharing ratio between duct and propeller; the proportion of duct thrust to total thrust decreases by 10.27% , and system aerodynamic performance worsens rapidly. The unsteady characteristic of tip clearance flow appears at large tip clearance ratio. Increasing propeller separation space can improve aerodynamic efficiency of ducted coaxial propeller. However, the influence is denotable as the relative variation in aerodynamic force is within 3% , due to the diffusion effect of duct on propeller slipstream.

Key words: ducted propeller; ducted coaxial propeller; aerodynamic performance; tip clearance; propeller separation space; unsteady numerical simulation

涵道螺旋桨是一种用涵道包围螺旋桨的动力装置,涵道与螺旋桨的结合可以大大提高系统的气动性能^[1].具体表现在:螺旋桨桨尖涡受到涵道壁的抑制,螺旋桨的有效直径和通过涵道的气流量增大;涵道唇口因前缘绕流产生附加拉力;涵道还改变了螺旋桨下游滑流状态^[2].同孤立螺旋桨相比,涵道螺旋桨具有功耗低、噪声小和结构紧凑的优点,在航空工程领域应用广泛.

涵道螺旋桨的流场复杂,20世纪50年代以来,国内外对其进行了大量的实验研究^[2-5]和计算方法的研究.涵道螺旋桨气动特性的计算方法主要分为3大类:动量滑流方法、涡流方法和CFD方法.当前,CFD方法是主流方法,可以分为基于动量源方法的定常模拟方法和非定常模拟方法.动量源方法略去了螺旋桨附近的流场细节^[6],非定常模拟可以精确地模拟各部件之间的相互作用和干扰,但是需要较大的计算资源.Euler方程不做无旋假设,可以捕获压差引起的分离涡,自动形成尾迹涡面^[7],而且计算量较N-S方程大大降低,在非定常计算中广泛应用.文献^[8]采用基于嵌套网格技术的Euler方程非定常计算手段比较了涵道螺旋桨和孤立螺旋桨的气动特性.

缝道间隙是影响内流流场的关键因素之一,叶轮机械领域中有关叶顶间隙对压气机性能影响的研究较为深入,一般认为,压气机叶片叶顶间隙处会出现泄漏涡,泄漏涡会减小质量流^[9];泄漏涡还会表现出周期性的波动,进而影响压气机的性能^[10];泄漏涡破碎时会导致机匣附面层增厚,引起压气机阻塞^[11]等等.同样地,桨尖间隙也会对涵道螺旋桨的气动性能产生重要影响.文献^[2,4]通过实验研究了桨尖间隙对涵道螺旋桨总体气动力的影响,得出了增大间隙会降低涵道螺旋桨性能的结论.但是这些研究并没有给出间隙对桨叶和涵道之间相互干扰的影响以及相应机理的阐述和分析,仍有必要就此做更深入的研究.

共轴双桨涵道是普通涵道螺旋桨和共轴双旋翼的结合体,兼具两者气动性能上的优点^[12].文献^[12-13]通过实验研究了一些气动参数对共轴双桨涵道气动性能的影响,文献^[12]还比较了共轴双桨涵道和孤立共轴双旋翼气动性能上的差异.双桨间距是共轴双桨涵道设计的重要几何参数之一.目前已有许多工作研究了双桨间距对孤立共轴双旋翼气动性能的影响^[14-15],但对于共轴双桨涵道,尚不清楚双桨间距对其气动性能的影响,需对此加以讨论.

本文将基于Euler方程对悬停状态下涵道螺旋桨流场进行非定常数值模拟,首先研究桨尖间隙对涵道螺旋桨(单桨)气动性能的影响,然后讨论双桨轴向间距对共轴双桨涵道气动性能的影响,期望能够加深对涵道螺旋桨流场的认识,为涵道螺旋桨的精细设计提供参考.

1 数值求解方法

控制方程为三维可压缩非定常Euler方程,其积分形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \mathbf{Q} dV + \oint_{\partial V} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} ds = 0 \quad (1)$$

式中 $\mathbf{Q}$ 为守恒向量, $\mathbf{F}$ 为对流量矢量项, V 表示控制体, ∂V 表示控制体边界, $\mathbf{n}$ 表示边界外法线方向.数值求解中采用格点格式的有限体积法对计算域进行离散,选用AUSM(advection upstream splitting method)格式计算对流量;使用双时间步法对控制方程进行隐式时间推进.

2 模型说明以及网格生成

本文选择文献^[3]中的涵道螺旋桨模型作为基准模型和验证算例模型,该模型外形如图1所示,具体尺寸参见文献^[3].



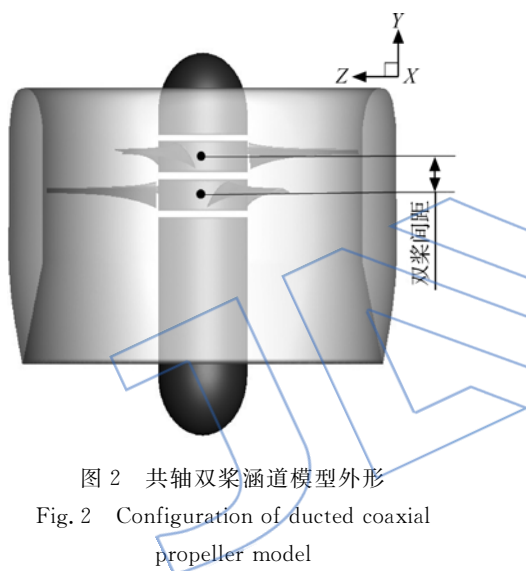
图1 基准模型外形

Fig. 1 Configuration of the original model

基准模型的桨尖间隙为 1.016×10^{-3} m,桨尖间隙与涵道内壁直径之比为0.27%.保持原始构型螺旋桨和涵道翼型的尺寸不变,增加涵道内壁的直径,可得到一系列不同桨尖间隙的涵道螺旋桨构型.本文比较了8种不同桨尖间隙构型的气动性能,其间隙比分别为0, 0.27%, 0.54%, 0.82%, 0.96%, 1.03%, 1.10%, 1.37%.由于

桨尖间隙相对于涵道内壁直径是一个小量,本文在结果分析中忽略了涵道内壁直径的变化对涵道气动力的影响。

基准模型涵道翼型中部为直线段,将直线段延长,在原来螺旋桨的下方增加一个反桨,即得到本文研究所需的共轴双桨涵道模型。保持上桨的位置不变,移动下桨的轴向位置可以得到不同间距的共轴双桨涵道模型。双桨涵道模型中上桨和涵道的位置与基准模型一致,上下两桨旋转速度相反,几何参数完全相同。本文研究了 5 种不同间距共轴双桨涵道模型的气动特性,其双桨间距与桨叶半径之比分别 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65。所有构型中,两个桨都在涵道直线段内(下桨未进入扩散段),桨尖间隙比都取为 0.27%。共轴双桨涵道模型如图 2 所示。



由于螺旋桨和涵道之间存在相对运动,数值求解时需要建立多个坐标系,相应地,在网格划分时需要将计算域划分为多个子域。其中,在螺旋桨附近生成旋转域,在涵道附近生成静止域。共轴双桨涵道模型的计算域中有两个旋转域。静止域和旋转域之间的交界面处采用滑移网格技术实现通量传递。共轴双桨涵道旋转域和静止域网格的空间切片图见图 3。

为降低计算量,利用桨叶旋转的周期性和涵道外形的对称性,在周向选取流场的 1/3 进行计算,定义周向两侧的面为周期性边界条件。由于涵道螺旋桨外形复杂,本文采用非结构网格离散流场。在螺旋桨前缘、涵道唇口以及桨尖间隙处做了适当的网格加密,忽略了桨毂和中心体之间的间隙。为保证结果比较的可靠性,单桨不同构型和双

桨不同构型下的网格划分策略和尺寸分别相同。涵道唇口和螺旋桨表面网格以及桨尖间隙网格切面分别如图 4 和图 5 所示。

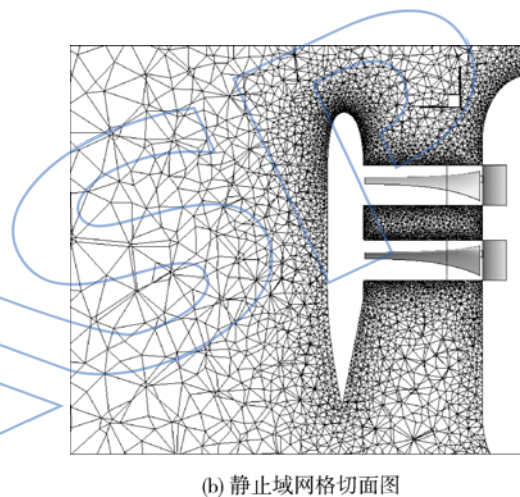
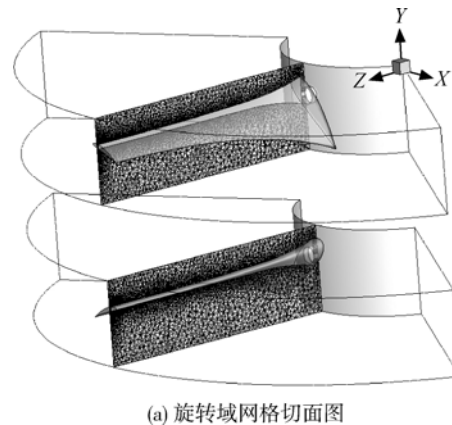


图 3 共轴双桨涵道流场计算的网格空间切片图
Fig. 3 Spatial slice meshes of flow field around the ducted coaxial propeller

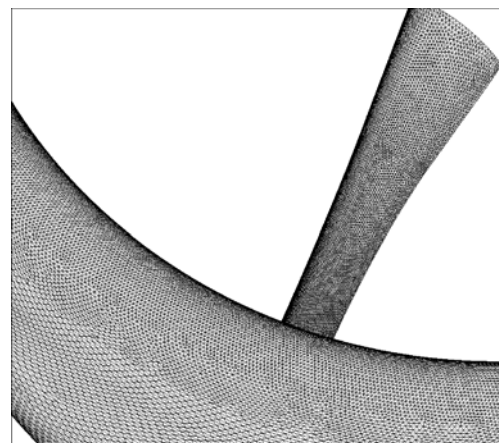


图 4 涵道和螺旋桨的表面网格
Fig. 4 Surface mesh of the duct and propeller

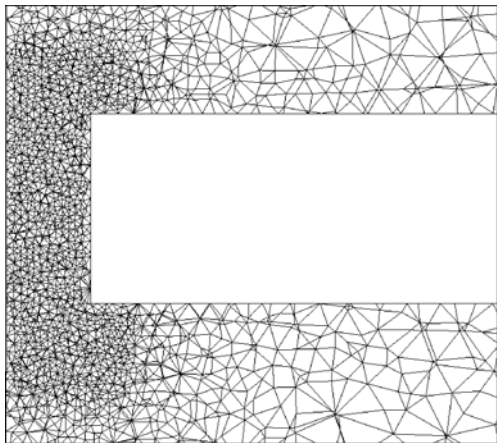


图5 桨尖间隙网格切面

Fig. 5 Spatial slice meshes of propeller tip region

3 计算结果和分析

悬停状态是涵道螺旋桨无人机的重要飞行状态之一,在此研究悬停状态下桨尖间隙以及双桨间距对系统气动性能的影响。计算中,螺旋桨的旋转角速度取为 8000 r/min,共轴双桨涵道模型的上下螺旋桨角速度大小相等,方向相反。本文首先对基准模型的流场进行了数值模拟,并同实验值进行对比。

3.1 验证算例

悬停状态基准模型在 8000 r/min 的转速下,数值计算和实验测量气动力的比较结果见表 1。表 1 说明涵道的拉力计算值比较准确,而螺旋桨的拉力和扭矩计算值偏差相对较大。同时注意到实验数据与本文数值计算所得螺旋桨拉力系数与扭矩系数的比值基本吻合,相对偏差为 3.94%。

本文计算值与实验值出现偏差,可能是由以下几个因素造成的。

- 1) 本文采用非结构网格,受制于计算量,桨叶前缘网格不够细密,导致螺旋桨上表面前缘吸力峰值较小,使得螺旋桨的拉力和扭矩计算偏小。
- 2) 实验中螺旋桨为塑料制成,在气动力的作用下可能会发生扭转变形,导致实验结果与作为刚体计算所得的数值结果有所偏离。
- 3) 本文计算没有考虑黏性效应。事实上,沿着涵道壁面发展的附面层会对桨尖间隙形成一定的堵塞效应,而且还可能与桨尖涡发生干扰。目前尚不清楚黏性效应对涵道螺旋桨气动力计算的影响。

涵道螺旋桨流场较为复杂,计算与实验值偏差的具体原因有待于下一步更加深入地研究。

表 1 数值计算与实验测量气动力结果对比
Table 1 Comparison of aerodynamic force between calculation and experiment

	总拉力 系数	涵道拉 力系数	螺旋桨 拉力系数	螺旋桨 扭矩系数
数值计算	0.3883	0.2432	0.1451	0.0238
实验测量	0.4359	0.2469	0.1890	0.0298
相对偏差/%	偏小 10.92	偏小 1.50	偏小 23.22	偏小 20.13

3.2 桨尖间隙对涵道螺旋桨气动性能影响分析

图 6 是涵道螺旋桨拉力系数和功率载荷随桨尖间隙比的变化图,功率载荷是系统总拉力与所需功率之比,可以用于表征气动效率。图 7 是同时时间站位等间距变化的 6 种桨尖间隙下涵道唇口横向截面速度分布的拟合图,图中横坐标为采样点到轮毂的距离与唇口处涵道半径之比(r/R),纵坐标为速度的绝对值。

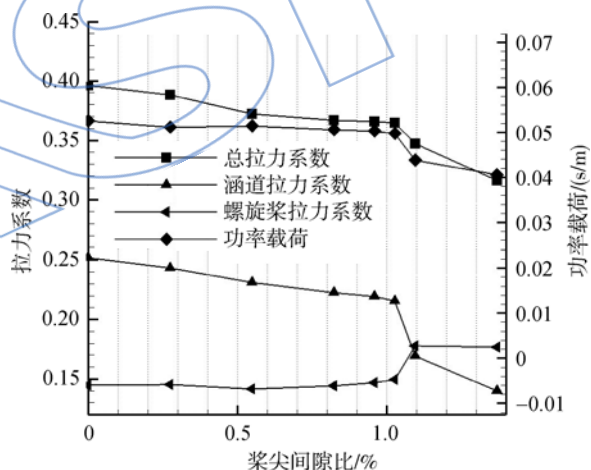


图6 涵道风扇气动力随桨尖间隙比变化图

Fig. 6 Aerodynamic performance of the ducted propeller with variation in tip clearance ratio

可以看到,系统的总拉力以及功率载荷都随着桨尖间隙的增大而减小,这与文献[4]中表述的趋势一致。随着桨尖间隙的增大,间隙区泄漏损失增多,涵道对螺旋桨下游滑流的改善作用降低,故系统的总拉力和功率载荷不断降低。

注意到在 1.10% 的间隙比附近,涵道螺旋桨气动性能发生显著变化:螺旋桨与涵道之间的拉力分配关系剧烈改变,涵道拉力占总拉力的比例由间隙比为 1.03% 时的 59.04% 陡降到 1.10% 时的 48.77%,变化幅度为 10.27%;系统总拉力和功率载荷亦明显降低。图 7 中的速度型在 1.10% 的间

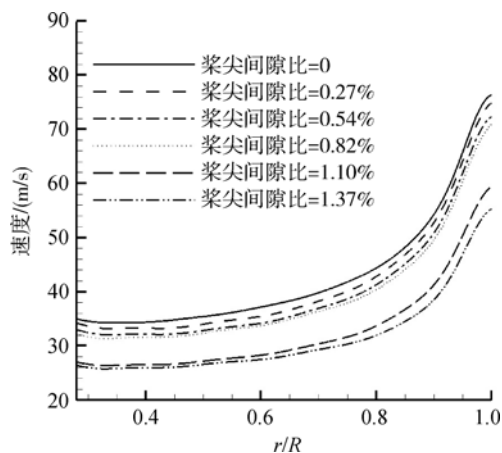


图7 涵道唇口横向截面速度分布图

Fig. 7 Velocity distribution in lateral section around the duct lip

隙比附近也表现出跃变特征. 这些突变与桨尖泄漏流的显著变化紧密相关.

图8、图9和图10分别为0.82%, 1.10%以及1.37%的间隙比下, 桨尖间隙截面流线图. 图中, SS表示桨叶的吸力面, PS表示桨叶的压力面. 可以看到, 3种间隙比下的间隙流场截然不同. 0.82%的桨尖间隙下, 桨尖间隙处的流动未受到阻塞; 桨尖间隙比为1.10%时, 桨尖处出现了

泄漏涡, 泄漏流显著增强, 流动受到堵塞; 桨尖间隙比为1.37%时, 桨尖处也出现了较大的泄漏涡, 而且桨尖泄漏流表现出很明显的非定常变化特征.

间隙泄漏流的显著改变是涵道螺旋桨气动性能在1.10%的间隙附近产生突变的原因. 泄漏流堵塞了涵道, 减小了涵道有效内径, 大大降低了通过涵道的空气流量. 结果使得涵道对螺旋桨的卸载作用明显减弱; 流量减小一方面使得涵道唇口负压降低, 导致涵道拉力减小; 另一方面使得螺旋桨叶素迎角增大, 桨叶拉力增大, 滑流扭转损失增大, 耗能增加, 系统功率载荷显著降低.

3.3 双桨间距对共轴双桨涵道气动性能影响分析

本文考查了5种不同双桨间距下的共轴双桨涵道气动性能, 为方便计算和讨论, 保持桨距和转速不变, 不做上下桨之间的扭矩平衡处理. 图11表现了涵道各部件气动系数时均值随双桨间距的变化, 图中横坐标表示双桨间距与桨叶半径之比(H/R_p). 图11(a)表示拉力系数随双桨间距变化关系, 图11(b)表示系统扭矩系数和功率载荷随着双桨间距的变化关系. 图中扭矩为桨叶受到的沿转轴方向的扭矩绝对值, 总扭矩系数为上下两桨扭矩系数绝对值之和, 表征系统耗能大小.

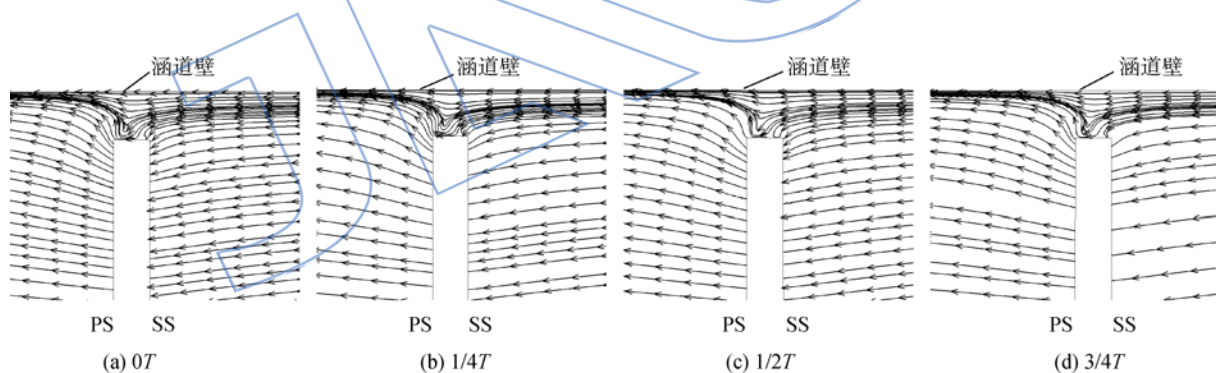


图8 0.82%桨尖间隙比下桨尖间隙流线图

Fig. 8 Streamlines around propeller tip at the tip clearance ratio of 0.82%

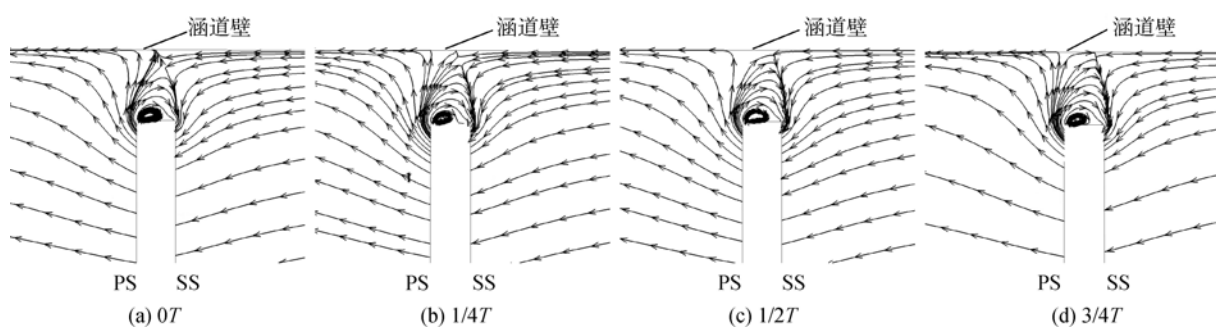


图9 1.10%桨尖间隙比下桨尖间隙流线图

Fig. 9 Streamlines around propeller tip at the tip clearance ratio of 1.10%

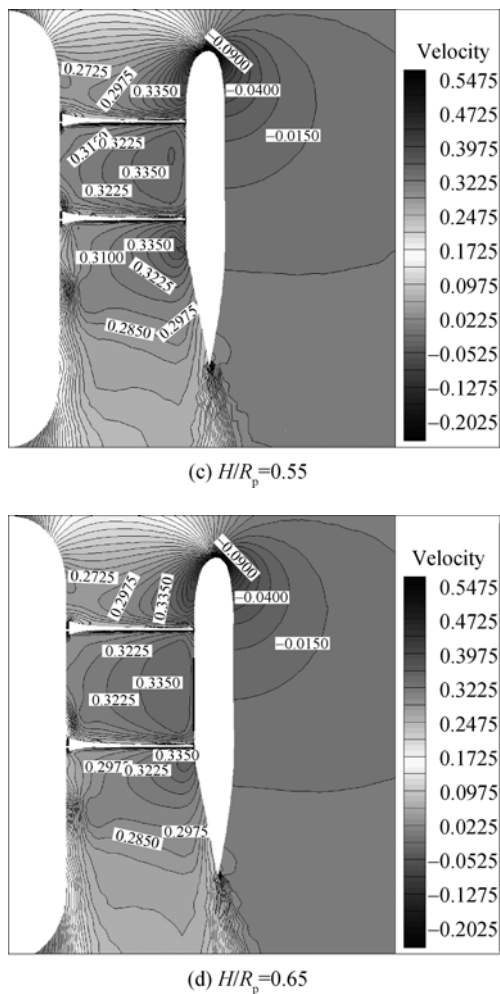


图12 不同双桨间距下中垂面上的轴向速度云图
Fig. 12 Axial velocity contour on the mid-plane at various propeller separation space

双桨涵道中垂面轴向无量纲速度云图. 可以看到涵道抑制了上桨滑流的收缩, 也阻止下桨吸入“新鲜的空气”. 因此, 下桨的整个桨盘都在上桨滑流内, 不同的双桨间距下双桨的滑流状态变化不大. 对于孤立共轴双旋翼, 不同双桨间距下的螺旋桨滑流收缩状态不同, 使得两桨之间的干扰程度不同, 引起系统气动性能发生变化^[15]. 而涵道对螺旋桨滑流的影响使得不同双桨间距下的螺旋桨气动特性并无显著差异, 进而导致共轴双桨涵道整体气动性能不会随着双桨间距改变发生明显变化.

孤立共轴双桨中, 下桨的下洗速度较上桨的大, 效率较上桨的小^[14]. 而在共轴双桨涵道中, 涵道对螺旋桨滑流的影响使得上下桨的下洗速度大致相当, 导致下桨的效率不再比上桨的小. 本文计算发现, 上下桨的效率比维持在 1:1.05 左右.

4 结 论

本文采用 Euler 方程, 运用基于非结构网格

的滑移网格技术, 对悬停状态下涵道螺旋桨流场进行非定常数值模拟, 考查了桨尖间隙和双桨间距对涵道螺旋桨气动性能的影响, 得出以下结论:

1) 随着桨尖间隙的增加, 系统拉力和功率载荷不断减小. 存在一个临界桨尖间隙, 在该桨尖间隙附近, 桨尖涡显著增强, 引起涵道和螺旋桨的拉力分配关系急剧变化, 功率载荷迅速降低, 系统气动性能明显恶化; 在较大的桨尖间隙下, 间隙泄漏流会表现出较为明显的非定常现象.

2) 增加共轴双桨的双桨轴向间距会导致系统拉力增加, 功率载荷减小. 但是, 由于涵道对螺旋桨滑流的改善作用, 双桨间距对系统总体气动性能的影响并不显著.

参考文献:

- [1] Ohanian III O J, Gelhausen P A, Inman D J. A compact method for modeling the aerodynamics of ducted fan vehicles[R]. AIAA-2010-1052, 2010.
- [2] Pereira J L. Hover and wind-tunnel testing of shrouded rotors for improved micro air vehicle design[D]. Maryland: University of Maryland, 2008.
- [3] Grunwald K J, Grunwald K W. Aerodynamic loads on an isolated shrouded-propeller configuration for angles of attack from -10° to 110° [R]. NASA TN D-995, 1962.
- [4] Martin P, Tung C. Performance and flowfield measurements on a 10-inch ducted rotor VTOL UAV[C] // Proceedings of the 60th Annual Forum of the American Helicopter Society. Baltimore: AHS, 2004: 88-107.
- [5] 李建波, 高正, 唐正飞, 等. 涵道风扇升力系统的升阻特性试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 164-168.
LI Jianbo, GAO Zheng, TANG Zhengfei, et al. Experimental investigation on lift and drag of ducted fan system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 36(2): 164-168. (in Chinese)
- [6] 于子文, 曹义华. 涵道尾桨的 CFD 模拟与验证[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 19-24.
YU Ziwen, CAO Yihua. CFD simulation and validation of ducted tail rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 19-24. (in Chinese)
- [7] 王刚. 复杂流动的网格技术及高效、高精度算法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
WANG Gang. New type of grid generation technique together with the high efficiency and high accuracy scheme researched for complex flow simulation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [8] 许和勇, 叶正寅. 涵道螺旋桨与孤立螺旋桨气动特性的数值模拟对比[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2820-2825.
XU Heyong, YE Zhengyin. Numerical simulation and comparison of aerodynamic characteristics between ducted and isolated propellers[J]. Journal of Aerospace Power, 2011,

- 26(12):2820-2825. (in Chinese)
- [9] 武楚利,刘前智,胡春波. 航空叶片机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2009.
- [10] 邓向阳. 压气机叶顶间隙流数值模拟研究[D]. 北京:中国科学院,2006.
- DENG Xiangyang. Numerical investigation on tip clearance flow in compressor[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [11] WU Yanhui, CHU Wuli, ZHANG Yanfeng, et al. The influence of tip clearance size on axial compressor rotor aerodynamics[R]. AIAA-2008-85, 2008.
- [12] Lee T E. Design and performance of a ducted coaxial rotor in hover and forward flight[D]. Maryland: University of Maryland, 2010.
- [13] Dyer K. Aerodynamic study of a small, ducted VTOL aerial vehicle[D]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [14] Coleman C P. A survey of theoretical and experimental coaxial rotor aerodynamic research[R]. NASA TP 3675, 1997.
- [15] Syal M. Contributions to the aerodynamic optimization of a coaxial rotor system[D]. Maryland: University of Maryland, 2008.