

文章编号:1674-8190(2019)03-348-07

桨叶实度及轴间距对摆线桨气动特性影响研究

冯旭碧,朱清华,雷良,黄杰

(南京航空航天大学 直升机旋翼动力学国家级重点实验室,南京 210016)

摘要: 悬停状态下,设计参数和摆线桨间距离对摆线桨的气动特性有较大影响。首先通过算例验证滑移网格计算方法应用于摆线桨悬停状态下气动力计算的准确性,然后研究摆线桨在不同半径、弦长和桨叶数时的气动参数特性,最后计算分析不同距离时,摆线桨间的气动干扰特性。结果表明:随着半径增大,桨叶气动力和单位面积上载荷均增大;弦长越大,气动力越大,桨叶单位面积上载荷反而越小;4 叶片摆线桨产生的气动力比 3 叶片和 6 叶片大,而 3 叶片的桨叶载荷最大;合力偏转角分别随转速和实度的增大而减小;随着摆线桨间距离的增加,气动力损失系数和合力偏转角均减小。

关键词: 摆线桨;数值模拟;流场特性;桨叶干扰

中图分类号: V211.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.03.007

Study on Aerodynamic Characteristics of Cyclorotor with Blade Solid and Distance between Axis

Feng Xubi, Zhu Qinghua, Lei Liang, Huang Jie

(National Key Laboratory of Science and Technology of Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The accuracy of the Sliding grid calculation method applied to the aerodynamics calculation is verified with an example in hovering, then, the aerodynamic parameters of cyclorotor with different radius, chord and number of blades are studied, and the aerodynamic interfere of cyclorotor with different distances is calculated and analyzed. The results show that with the increase of radius, the aerodynamics and the load per unit area of the blade increase; the larger the chord, the larger the aerodynamics, the smaller the load per unit area of the blade; the aerodynamics generated by the 4-blade cyclorotor is larger than that of 3-blade cyclorotor and 6-blade cyclorotor, while the blade load of 3-blade cyclorotor is the largest; the resultant deflection angle decreases with the increase of the rotational speed and the solidity respectively; with the increase of the distance among the cyclorotors, the aerodynamic loss coefficient and the resultant force deflection angle are decreased.

Key words: cyclorotor; numerical simulation; flow field characteristic; blade interference

0 引言

摆线桨是一种新型的全向矢量推力装置,由于具有操纵性能好、气动效率高和噪音低的优点,将其作为未来垂直起降飞行器、高空长航时无人机、

飞艇和舰船等诸多领域的推进/升力系统具有较好的应用前景^[1-3]。而设计参数的选择和气动性能是影响摆线桨应用前景的关键因素,虽然国内外已经对摆线桨开展了相关研究,但关于气动参数特性研究的文献并不多,甚至由于试验或测量误差的原

收稿日期:2018-07-21; 修回日期:2018-10-09

基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地(试验室)开放基金资助(kfj20170101);中央高校基本科研业务费专项资金资助

通信作者:冯旭碧,2283983464@qq.com

引用格式:冯旭碧,朱清华,雷良,等. 桨叶实度及轴间距对摆线桨气动特性影响研究[J]. 航空工程进展,2019,10(3):348-354.

Feng Xubi, Zhu Qinghua, Lei Liang, et al. Study on aerodynamic characteristics of cyclorotor with blade solid and distance between axis[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 348-354.

因,不同文献中得出不同的结论。例如文献[4]和[5]均通过试验研究了半径的影响,但前者指出相同弦长时气动力随半径的变化不大,而后者表明半径越大气动力越大。同时,文献[6]以功率载荷为参照,对翼型厚度、俯仰轴位置及最大俯仰角等部分设计参数进行了分析,而对半径和弦长等参数未进行研究,并且没有研究参数影响的耦合作用。

本文首先研究与实度相关的设计参数,将半径、弦长和桨叶数归纳为实度的影响,总结实度与单位面积上桨叶载荷的关系,然后分析摆线桨相互之间的气动干扰特性,国内外学者还未对这方面进行过研究。

1 建模计算

1.1 摆线桨原理

摆线桨主要由支架、偏心控制机构及两片以上的桨叶等构成,其三维原理图如图 1 所示,桨叶展向与旋转轴平行,桨叶在绕转轴公转的同时,桨叶绕变距轴做俯仰振荡^[1]。桨叶桨距角随方位角的变化,桨叶在底部和顶部时都产生正升力如图 2 所示,可以通过改变桨距角幅值或转速控制力的大小,改变偏心装置的相位角控制力的方向。

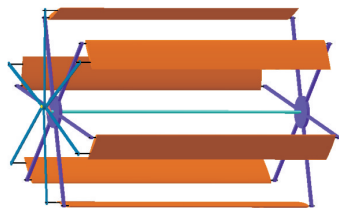


图 1 摆线桨原理图

Fig. 1 Schematic diagram of cyclorotor

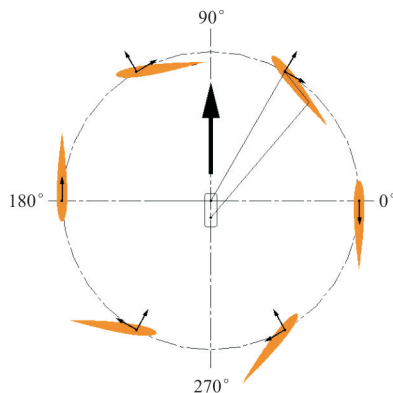


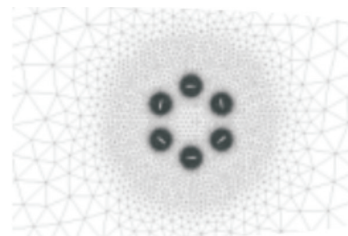
图 2 桨距角随方位角的变化

Fig. 2 Change of pitch angle with azimuth

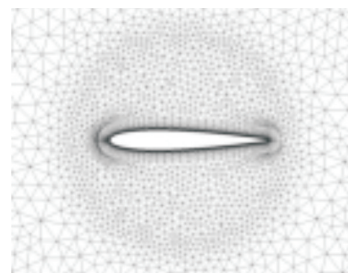
1.2 模型建立与网格划分

采用 Fluent 的非定常数值模拟模块,分析摆线桨的气动机理和桨叶间干扰。因为摆线桨桨叶为直桨叶,桨叶展向的形状和运动规律几乎一致,所以展向流场变化较小,考虑到计算量和计算时间的效益,将摆线桨简化为二维网格进行数值模拟。

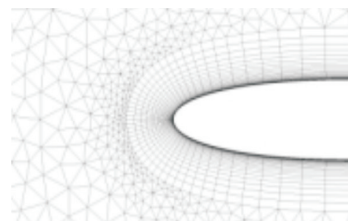
摆线桨二维网格示意图如图 3 所示,采用滑移网格技术^[7-8],将计算域划分为:外部静止域、旋转域和包含桨叶的旋转区域,为了更好地捕捉桨叶附近的流场细节,在桨叶周围添加边界层网格。本文采用适合于求解低速不可压缩流动的压力基求解器,文献[10]表明采用 S-A 模型和 SST 均可较好的计算摆线桨的升力,但前者对功率的计算更准确,因此本文选取 S-A 模型。桨叶桨距角的变化规律以正弦函数近似描述,通过用户自定义函数(UDF)中的 DEFINE_ZONE_MOTION 宏实现。



(a) 全局网络



(a) 局部网络



(a) 附面层网络

图 3 摆线桨初始网格

Fig. 3 Initial meshes of cyclorotor

1.3 网格无关性验证

对于非稳态数值模拟,需要确定所用网格数与结果之间的无关联性,即网格无关性验证,本文主要探讨计算结果中竖直拉力的无关性检验。对 A, B, C 三种网格数量进行无关性检验,得出的结果如表 1 所示。

表 1 网格无关性验证结果

Table 1 Results of grid independence verification

网格数量/个	拉力/N	误差/%
A/43 533	22.29	10.83
B/61 219	23.60	5.32
C/106 827	24.33	2.67

从表 1 可以看出:网格数量对模拟结果具有极大影响,网格数量低于 4.3 万时,计算结果与试验值有较大误差,而当网格数数量超过 6 万时,模拟结果变化差异不大。

1.4 数值模拟方法验证

为了检验本文 CFD 数值模拟方法的有效性,以韩国首尔大学的摆线浆静拉力试验为算例^[6],该试验中摆线浆的设计参数为:半径 R 为 0.4 m,弦长 c 为 0.15 m,展长 b 为 0.8 m,最大俯仰角为 25° ,采用 NACA0012 翼型。通过 CFD 计算所得摆线浆的速度云图和速度流线图分别如图 4 和图 5 所示,CFD 拉力计算值与试验值的对比曲线如图 6 所示。

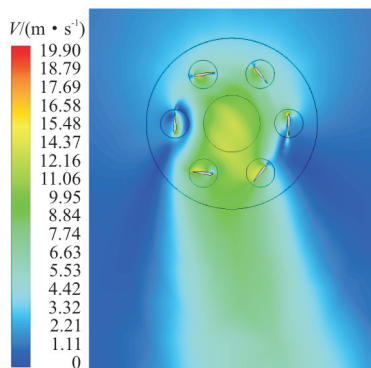


图 4 摆线浆速度云图

Fig. 4 Velocity contour of cyclorotor

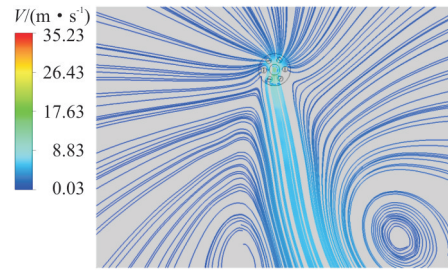


图 5 摆线浆流线图

Fig. 5 Treelines pattern of cyclorotor

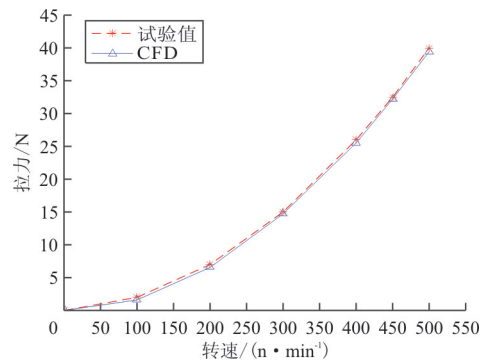


图 6 拉力计算值与实验值对比($N_b=6$)

Fig. 6 Comparison of thrust calculation and test values

从图 6 可以看出:二维数值模拟结果与试验值吻合较好。因此,采用二维非定常数值模拟方法研究摆线浆的气动特性和参数影响是可行的。

2 气动参数特性研究

为了更清楚观察实度对气动性能的影响规律,相关的设计参数主要包括半径、弦长和桨叶数。摆线浆气动系数以无量纲形式表示为^[11]:

$$C_T = \frac{T}{0.5 \times \rho (R\Omega)^2 (\pi b d)} \quad (1)$$

摆线浆实度表示为:

$$\sigma = \frac{N_b c}{2\pi R} \quad (2)$$

式中: T 为摆线浆产生的气动力; Ω 为角速度; b 为摆线浆展长; d 为直径; R 为半径; N_b 为桨叶片数; c 为桨叶弦长。

2.1 半径影响

摆线浆不同半径时竖直拉力随转速的变化如图 7 所示。

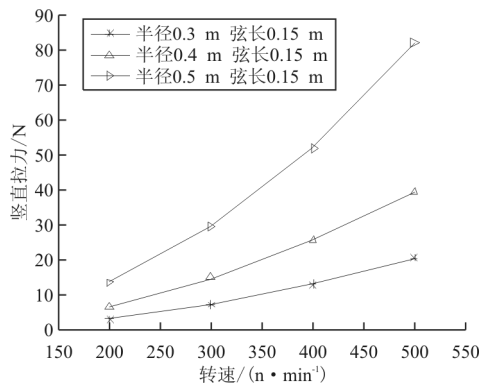


图 7 不同半径下拉力随转速变化曲线 ($N_b=6$)

Fig. 7 Thrust variation with respect to the rotational speed at different radius

从图 7 可以看出: 半径越大, 竖直拉力越大, 且半径越大, 竖直拉力增加越明显。桨叶单位面积上载荷 (C_T/σ) 随转速的变化如图 8 所示。

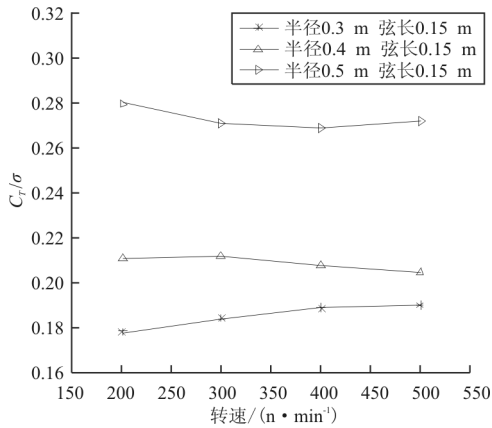


图 8 不同半径下 C_T/σ 随转速变化曲线 ($N_b=6$)

Fig. 8 C_T/σ variation with respect to the rotational speed at different radius

从图 8 可以看出: 与拉力变化一致, 半径越大, 桨叶单位面积上载荷越大。

2.2 弦长影响

选取半径为 0.5 m, 弦长分别为 0.10 m, 0.15 m 和 0.20 m 的摆线桨为研究对象, 研究桨叶间的干扰特性如图 9~图 10 所示。从图 9 和 10 中对比看出: 虽然摆线桨产生的拉力随弦长的增加而增加, 但是桨叶单位面积上的载荷反而减小。且由于弦长越大, 桨叶间干扰增加, 竖直拉力增加效果越不明显。

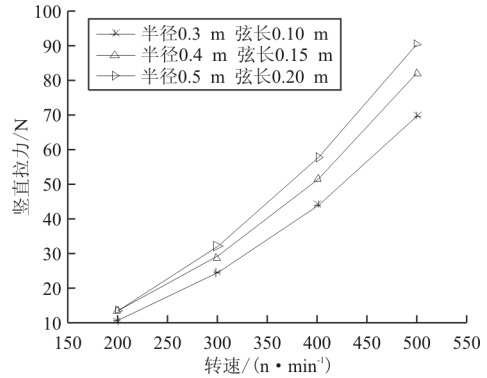


图 9 不同弦长下拉力随转速变化曲线 ($N_b=6$)

Fig. 9 Thrust variation with respect to the rotational speed at different chord length

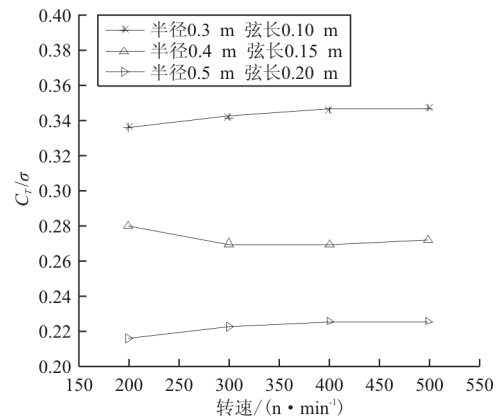


图 10 不同弦长下 C_T/σ 随转速变化曲线 ($N_b=6$)

Fig. 10 C_T/σ variation with respect to the rotational speed at different chord length

2.3 桨叶数影响

相同半径和弦长时, 桨叶片数对摆线桨气动性能的影响如图 11~图 12 所示。

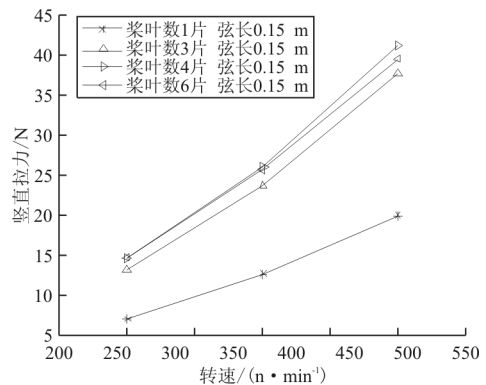


图 11 不同桨叶数下拉力随转速变化曲线

Fig. 11 Thrust variation with respect to the rotational speed at different blade numbers

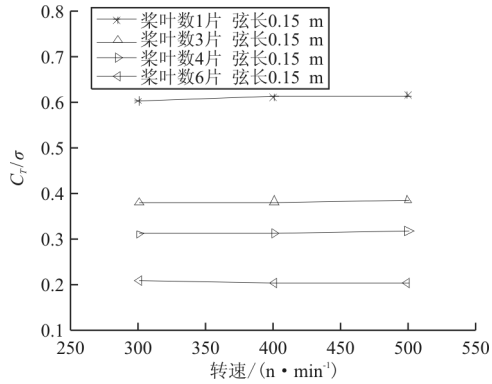


图 12 不同桨叶数下 C_T/σ 随转速变化曲线
Fig. 12 C_T/σ variation with respect to the rotational speed at different blade numbers

从图 11~图 12 可以看出:相同条件下,4 叶片产生的拉力最大,且在较高转速时,拉力明显高于 6 叶片,而图 12 表明单叶片的桨叶载荷最高,3 叶片、4 叶片和 6 叶片依次减小,这可能是由于桨叶数增加,桨叶间干扰增强造成的。桨叶载荷的对比如表 2 所示。

表 2 桨叶数对桨叶载荷的影响

Table 2 Effect of blade number on blade load

桨叶数/片	实度	C_T	C_T/σ	变化情况
1	0.060	0.037	0.617	—
3	0.179	0.070	0.388	37.11%
4	0.239	0.076	0.319	48.23%
6	0.382	0.086	0.226	63.44%

桨叶数对周期气动力的影响如图 13~图 14 所示,可以发现桨叶数对摆线桨的气动力影响较大^[12],主要影响区域是方位角 $30^\circ \sim 150^\circ$ 和 $240^\circ \sim 300^\circ$ 。

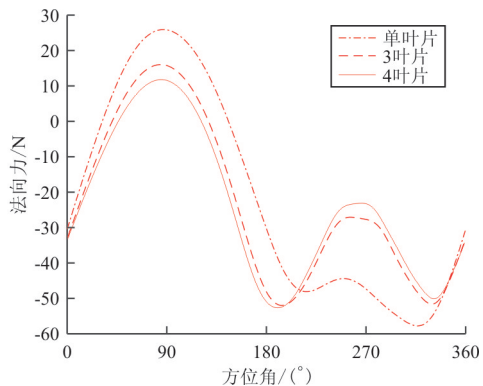


图 13 不同桨叶数法向力对比

Fig. 13 Comparison of normal force between different blade numbers

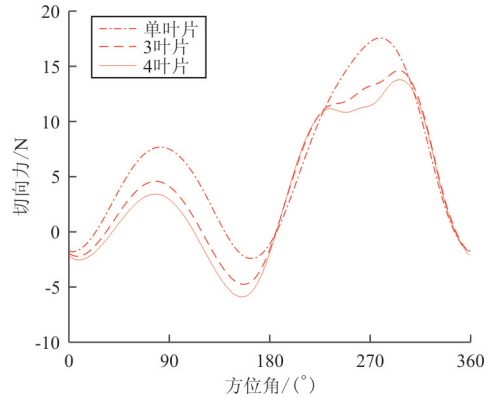


图 14 不同桨叶数切向力对比

Fig. 14 Comparison of tangential force between different blade numbers

摆线桨产生的合力随实度和转速变化的关系如表 3 所示。

表 3 合力方向随实度及转速变化对比

Table 3 Comparison of resultant force direction with solidity and rotation speed

实度	300 rpm	400 rpm	500 rpm
	合力方向/ $^\circ$		
0.060	10.51	9.59	9.37
0.179	8.11	7.76	6.98
0.239	7.67	7.52	6.76
0.382	5.47	5.07	4.62

从表 3 可以看出:摆线桨的转速和实度都会影响合力的方向。对单个摆线桨而言,转速和实度越大,合力与竖直方向的夹角越小。

3 双摆线桨气动特性研究

上一节中研究了单个摆线桨的气动参数特性,本节将应用同样的模型和方法分析不同间隔距离时,两个摆线桨之间的气动干扰特性,可以作为摆线桨总体布局的依据,研究模型如图 15 所示。

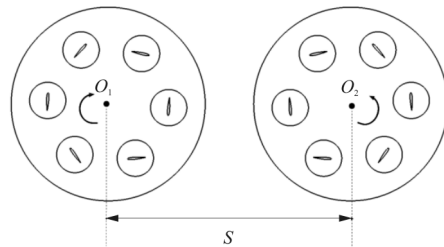


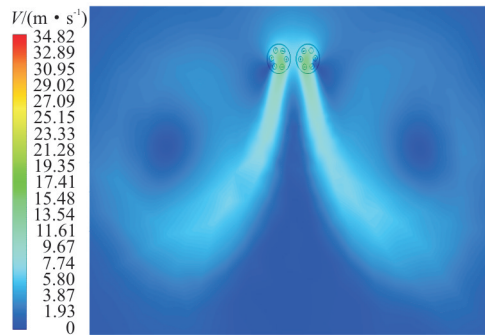
图 15 两个摆线桨之间的纵向间隔距离 S
Fig. 15 The longitudinal distance between two cycloid propellers

当两摆线桨间距分别为 $4R$, $5R$ 和 $6R$, 转速为 600 rpm 时, 摆线桨的升力损失系数及合力方向的变化如表 4 所示, 可以看出: 随摆线桨间距离的增大, 合力偏转角减小。不同间距时, 摆线桨速度云图和速度流线图的对比如图 16~图 17 所示。

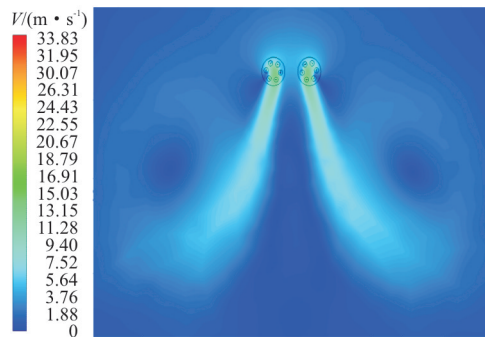
表 4 不同纵向间隔的升力与偏转角比较

Table 4 Comparison of different longitudinal distances

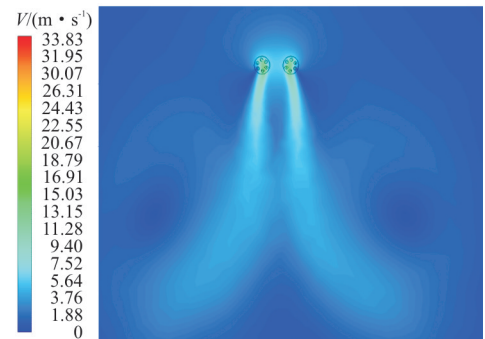
距离 S	升力 L/N	偏转角 $\theta/(\circ)$	升力损失/%
$4R$	80.7	15.8	27.1
$5R$	85.8	15.1	22.5
$6R$	92.7	14.2	16.3
单个	110.7	9.8	0



(a) 纵向间隔 $4R$



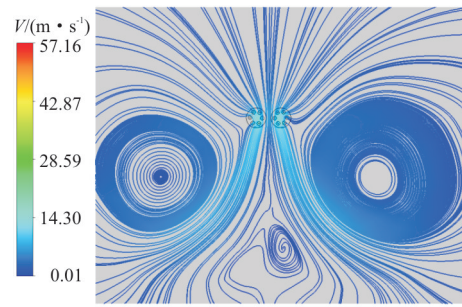
(b) 纵向间隔 $5R$



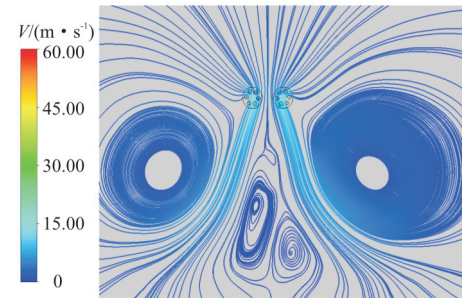
(c) 纵向间隔 $6R$

图 16 不同纵向间隔两个摆线桨干扰的速度云图

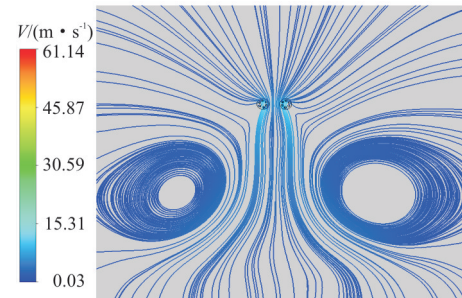
Fig. 16 The velocity contours of two cycloid propellers for different longitudinal distances



(a) 纵向间隔 $4R$



(b) 纵向间隔 $5R$



(c) 纵向间隔 $6R$

图 17 不同纵向间隔两个摆线桨干扰的速度流线图

Fig. 17 The velocity streamlines of two cycloid propellers for different longitudinal distances

4 结 论

(1) 摆线桨半径越大, 气动力越大, 随转速的增加更明显, 桨叶载荷越大, 桨叶间干扰越小。

(2) 虽然摆线桨产生的推力随弦长的增加而增加, 但是桨叶单位面积上的载荷反而减小。因此, 弦长越大, 桨叶间干扰越大, 推力增加效果越不显著。

(3) 相同条件下, 4 叶片摆线桨产生的气动力比 3 叶片和 6 叶片大, 而 3 叶片的桨叶载荷最大。

(4) 摆线桨合力的方向与转速和实度相关, 合

力偏转角分别随转速和实度的增大而减小。

(5) 随着摆线桨间距离的增加,气动力损失系数和合力偏转角均减小。

因此,在摆线桨设计中,需要综合考虑摆线桨关键设计参数和摆线桨间距离对气动性能的影响,从任务载荷需求、气动高效性、结构紧凑性等多方面进行考虑,进行摆线桨的参数选择和总体布局。

参考文献

- [1] 唐继伟, 胡峪, 宋笔锋. 摆线桨气动性能研究进展[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(5): 676-684.
Tang Jiwei, Hu Yu, Song Bifeng. Cycloidal rotor aerodynamic performance research progress [J]. Aerodynamics Sinica, 2013, 31(5): 676-684. (in Chinese)
- [2] Jarugumilli T, Lind A, Benedict M, et al. Experimental and computational flow field studies of a MAV-scale cycloidal rotor in forward flight[C]// American Helicopter Society 69th Annual Forum. Phoenix AZ, 2013.
- [3] Min S Y, Lee C H, Seung M H, et al. Experimental study of a quadrotor cyclocopter[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2015, 60(3): 1-10.
- [4] Benedict M, Jarugumilli T, Chopra I. Effect of rotor geometry and blade kinematics on cycloidal rotor hover performance[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(5): 1340-1352.
- [5] Kim S J, Yun C Y, Kim D, et al. Design and performance tests of cycloidal propulsion systems[C]// 44 th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. [S. l.]: AIAA, 2003: 1786-1792.
- [6] 唐继伟, 胡峪, 宋笔锋. 关键设计参数对摆线桨气动性能影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(2): 297-305.
- Tang Jiwei, Hu Yu, Song Bifeng. The influence of key design parameters on the aerodynamic performance of cycloidal rotors[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(2): 297-305. (in Chinese)
- [7] Benedict M, Ramasamy M, Chopra I, et al. Performance of a cycloidal rotor concept for micro air vehicle applications [J]. Journal of the American Helicopter Society, 2010, 55(2): 22002-22002.
- [8] Hu Y, Du F, Zhang H L. Investigation of unsteady aerodynamics effects in cycloidal rotor using RANS solver[J]. The Aeronautica Journal, 2016, 120(1228): 956-970.
- [9] Xisto C, Leger J, Páscoa J, et al. Parametric analysis of a large scale cycloidal rotor in hovering conditions[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2017, 30(1): 1-4.
- [10] Sirohi J, Parsons E, Chopra I. Hover Performance of a cycloidal rotor for a micro air vehicle[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2007, 52(3): 263-279
- [11] 唐继伟. 微小型滚翼机的摆线桨设计方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
Tang Jiwei. Research on the design of cycloidal propeller for micro cyclocopter [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2016. (in Chinese)

作者简介:

冯旭碧(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:旋翼飞行器总体设计。

朱清华(1975—),男,博士,副教授。主要研究方向:旋翼飞行器总体设计、直升机飞行力学与控制、直升机工程。

雷良(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:旋翼飞行器总体设计。

黄杰(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:旋翼飞行器总体设计。

(编辑:沈惺)