

旋翼螺旋桨巡航及悬停状态气动特性研究^{*}

闫文辉¹, 邓佳子¹, 王向阳², 杨 骁³, 刘昌交¹

(1. 北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144;

2. 清华大学 航空发动机研究院, 北京 100084;

3. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 为了提高旋翼螺旋桨的综合气动性能, 基于叶素-动量组合理论并耦合了计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 方法, 设计了一款旋翼螺旋桨, 进行了螺旋桨巡航及悬停状态的气动特性计算及流场仿真, 计算结果与风洞试验数据进行了对比分析。研究表明, 在进行网格无关性研究基础上, 数值计算与风洞试验的误差较小, 设计点平均计算误差为3.0%左右, 所采用的CFD计算方法具有较高准确性和可信度。设计的旋翼螺旋桨巡航效率高于80%, 悬停效率高于70%, 具备了较好的巡航及悬停的综合气动性能。

关键词: 旋翼螺旋桨; 气动特性; 数值计算; 多重参考系法; 悬停效率

中图分类号: V275 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210622-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210622

Aerodynamic Performance of Rotor Propeller in Cruise and Hover Status

YAN Wen-hui¹, DENG Jia-zi¹, WANG Xiang-yang², YANG Xiao³, LIU Chang-jiao¹

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

2. Aero Engine Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the aerodynamic performance of the rotor propeller, aerodynamic design of a rotor propeller based on the blade element momentum theory (BEMT) and computational fluid dynamic method was implemented. The aerodynamic performance and flow field of the rotor propeller in the cruise and hover status was calculated using CFD method, and numerical results were compared with wind tunnel test data. The research conclusion show that the numerical results are in good agreement with the experimental data after considering the grid independence study. The average calculation error of design point is about 3.0%, and the CFD method has high accuracy and reliability for practical engineering application. The designed rotor propeller has good comprehensive aerodynamic performance with higher than 80% cruise efficiency and 70% hover efficiency.

Key words: Rotor propeller; Aerodynamic performance; Numerical simulation; MRF approach; Hover efficiency

* 收稿日期: 2021-09-07; 修订日期: 2021-11-18。

基金项目: 先进航空发动机创新工作站基金 (HKCX-2019-01-005)。

作者简介: 闫文辉, 博士, 高级工程师, 研究领域为航空推进。

通讯作者: 王向阳, 博士, 助理研究员, 研究领域为飞/推综合控制, 动力学建模等。

引用格式: 闫文辉, 邓佳子, 王向阳, 等. 旋翼螺旋桨巡航及悬停状态气动特性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8):210622.
(YAN Wen-hui, DENG Jia-zi, WANG Xiang-yang, et al. Aerodynamic Performance of Rotor Propeller in Cruise and Hover Status[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210622.)

1 引 言

倾转旋翼飞机^[1-6]是垂直起降固定翼飞机的一种,其独特构型使该类飞行器具有地面垂直起飞、高效空中悬停和高速前飞巡航的特点。因此,倾转旋翼技术在目前世界各国的航空领域里备受关注。旋翼螺旋桨作为倾转旋翼机的典型推进装置,对该类飞行器的高速平飞巡航和垂直起降综合气动特性起着至关重要的作用。

由于旋翼螺旋桨面临的飞行工况较多,因此会引入更加复杂的气动问题,这些问题主要表现在:(1)旋翼螺旋桨既要在垂直起降模式下提供向上升力,又要在平飞巡航模式下提供前飞的拉力,这给多目标的气动设计带来了更大的困难。其气动外形设计是直升机旋翼和固定翼螺旋桨两种类型的折中^[7]。(2)旋翼螺旋桨与机翼间存在复杂的气动干扰,螺旋桨滑流的上洗、下洗作用会影响机翼气动性能,机翼的阻塞作用也会影响螺旋桨的气动性能^[8]。(3)在由直升机模式向固定翼前飞模式转换的倾转过渡过程中,旋翼螺旋桨周围流场环境变得更加复杂,相关气动参数的非定常变化更加严重。因此,以兼顾高速平飞巡航、高效垂直起降及稳定空中悬停的旋翼螺旋桨气动设计、数值仿真及实验验证具有非常重要的学术意义和工程应用价值。

鉴于上述原因,国内外学者对旋翼螺旋桨的气动设计、滑流仿真、实验吹风等方面进行了比较丰富的研究。Christian等^[9]提出了考虑螺旋桨对机翼气动特性影响的多学科设计优化框架,开发了机翼-螺旋桨全交互气动性能计算程序,并将其与结构和性能模型相结合,有效地模拟机翼对螺旋桨滑流发展的影响。Waqas等^[10]基于叶素-动量组合理论开发了无人机螺旋桨气动计算模型,该模型能够预测不同攻角下的螺旋桨气动力和力矩,通过与实验以及其它仿真的比较,证明了该模型的有效性。Alexandre等^[11]在机翼最小诱导阻力理论的基础上,提出了一种尾流分析方法,并用于一种高速飞行的双叶螺旋桨设计开发。与常规螺旋桨相比,降低了叶尖涡强度,改善了性能;Vigevano等^[12]重新设计了Erica倾转旋翼飞机,对桨叶气动外形以及螺旋桨与机翼的气动干扰等都进行了研究,并通过计算和试验验证了气动性能的提升效果。Andrejs等^[13]使用了一种桨叶主动扭转控制方法,优化设计了旋翼螺旋桨,通过数值仿真,提高了螺旋桨的气动性能,并有效降低了螺旋桨噪声。贺军等^[14]设计了某型无人机的两叶木质

螺旋桨,基于片条理论计算了螺旋桨的气动性能,通过对螺旋桨的地面试验,说明了螺旋桨性能计算与台架试验具有较好的一致性,该螺旋桨可以满足无人机的巡航效率与拉力需求。项松等^[15]根据给定的飞行速度、螺旋桨转速、拉力、直径、桨叶数等,提出了一种螺旋桨设计方法,该方法能够计算出最大效率螺旋桨的几何特性,并通过数值计算和风洞试验,验证了该设计方法的有效性。郭佳豪等^[16]建立了耦合CFD修正的螺旋桨快速设计方法,并对一太阳能无人机的螺旋桨进行了设计,该方法能较好地满足螺旋桨拉力要求,而且螺旋桨效率有一定提高。唐伟等^[17]以垂直起降无人机的垂直起降和快速巡航对螺旋桨性能的不同要求,开展了针对两个设计点的螺旋桨设计,通过实验和计算验证了所设计的螺旋桨满足要求。与单个设计点的旋翼或螺旋桨相比,基于两个设计点的螺旋桨会降低螺旋桨在每个单独设计点的工作性能。范中允等^[18]提出了一种根据任意给定环量分布及工况的螺旋桨快速设计方法,通过对一个设计的螺旋桨性能的计算,说明该方法能够根据给定环量分布进行精确设计,相对误差不超过7.0%。

马率等^[19]采用了动态重叠网格技术计算了螺旋桨飞机巡航构型的低速流场,并且利用当地动压增量来定义滑流的加速效应边界,利用当地气流角增量来定义滑流的洗流效应边界,从而说明了螺旋桨复杂滑流的特点,解释了由于滑流对飞机部件干扰而使得飞机方向安定性呈现的非线性现象。Droandi等^[20]研究了旋翼螺旋桨由直升机模式转换到飞机模式时,倾转旋翼飞机机翼和旋翼之间的气动干扰问题。通过对缩比半模的风洞试验,获得了详细的机翼气动载荷及旋翼螺旋桨的气动性能。邓阳平等^[21]使用了滑移网格的CFD方法以及实验手段,对比分析了不同近地高度下的涵道螺旋桨拉力和功率特性,说明了地面效应的影响机理,指出地面效应对涵道螺旋桨近地悬停状态的气动性能有明显影响,在进行气动和总体方案设计时要重点考虑。龚小权等^[22]基于非结构混合网格及网格重叠技术,研究了螺旋桨动力特性和螺旋桨滑流对飞机气动特性的影响。螺旋桨拉力系数和扭矩系数的计算与试验吻合较好。廖鹏等^[23]利用最佳环量分布并结合激励盘方法,计算了螺旋桨滑流的影响。该方法不依赖试验数据,计算量较小,方便快速确定螺旋桨滑流对机翼气动特性影响。

本文基于雷诺平均N-S方程(Reynolds Aver-

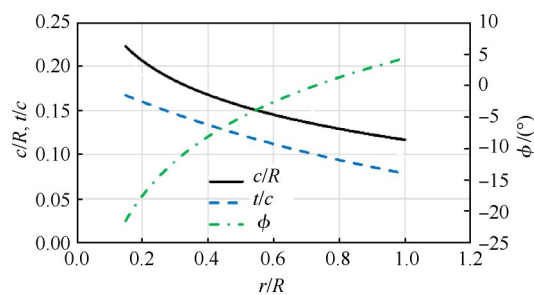
aged Navier–Stokes, RANS)方法,对设计的一款旋翼螺旋桨进行了CFD数值计算,并与实验数据进行了对比分析。研究了计算网格对结果的影响,在此基础上,对该旋翼螺旋桨的悬停状态和巡航状态分别进行了计算,获得了螺旋桨的拉力系数、功率系数及效率的变化规律。通过CFD计算数据与风洞试验的对比,发现该旋翼螺旋桨的巡航效率和悬停效率都比较高,具有较高的综合气动性能,本文所采用的数值计算方法具有较好的工程可靠性和精度。

2 方法

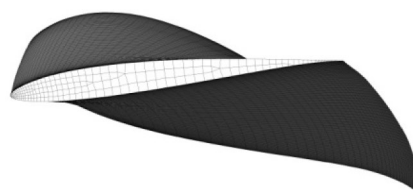
2.1 桨叶气动设计及建模

本文设计的旋翼螺旋桨的巡航马赫数为0.25,额定前进比为2.92,桨叶直径1.05m,桨毂直径0.12m,桨叶数为3。本文在使用叶素-动量组合理论设计过程中,以巡航工况为基准,在确定的旋翼螺旋桨的几何参数及桨叶各截面翼型的条件下,初步设计出沿桨叶半径方向上的桨叶角分布,再考虑悬停条件的约束,折衷设计出最终的桨叶角度。选用的20%,60%及90%桨叶半径位置的翼型如图1所示,分别是在GOE434,GOE255,AG24系列翼型基础上进行了一定的优化。基于叶素-动量组合设计理论可知,在平飞巡航状态下,旋翼螺旋桨工作在大桨距、大前进比、低转速的情况;在垂直起降状态下,旋翼螺旋桨工作在小桨距、高转速、大载荷的情况。为了提高螺旋桨的综合气动效率,折衷优化了桨叶各半径位置的弦长和桨叶的扭转角度,最终桨叶的从根到尖的

扭转角度约为 28.7° ,图2(a)为桨叶翼型弦长、翼型厚度和桨叶扭转角沿半径的无量纲分布曲线图,图中 c/R 代表弦长与桨叶完整半径之比, t/c 表示翼型厚度与弦长之比, ϕ 表示桨叶扭转角度, r 为桨叶当地半径。图2(b)显示了设计得到的桨叶几何模型。通过气动设计,尽量保证桨叶各半径位置的翼型工作在最优升阻比附近,以提高旋翼螺旋桨的综合气动性能。



(a) Blade design characteristics



(b) Twisted blade of rotor propeller

Fig. 2 Airfoils and blade of the rotor propeller

不同桨叶半径处翼型的升力系数和阻力系数是叶素-动量组合理论重要的输入参数之一,直接影响气动设计的准确性。为了保证气动设计的准确性,在设计过程中,首先调用基于非定常 Navier–Stokes 方程组开发的二维CFD计算程序,在给定螺旋桨实际工作情况下的各半径位置翼型上的马赫数和雷诺数后,计算出某一确定攻角下的翼型升力系数 C_L 和阻力系数 C_D 。然后,将所计算的 C_L 和 C_D 传递给基于叶素-动量组合理论的气动设计程序,计算旋翼螺旋桨的气动性能,若满足要求,则进行桨叶的几何实体造型和数据输出,若不满足要求,则调整翼型攻角和弦长,重新进行计算。图3(a)中显示了一个典型的 5° 攻角下翼型的压力云图,图3(b)中是使用CFD方法计算的75%桨叶半径处翼型升力系数、阻力系数随攻角的变化,图3(c)显示了设计得到的三叶变距旋翼螺旋桨几何模型。另外,由于标准的叶素-动量组合设计理论并没有考虑螺旋桨实际流动中的一些损失,本文设计程序中进行了三维流动修正及桨尖损失修正等措施^[24]。三维流动修正采用公式(1),式中 r 表示桨叶当地半径, R 表示桨叶完整半径, ω 表示螺旋桨旋转角速度, c 表示翼型弦长, $C_{L_{2D}}$ 表

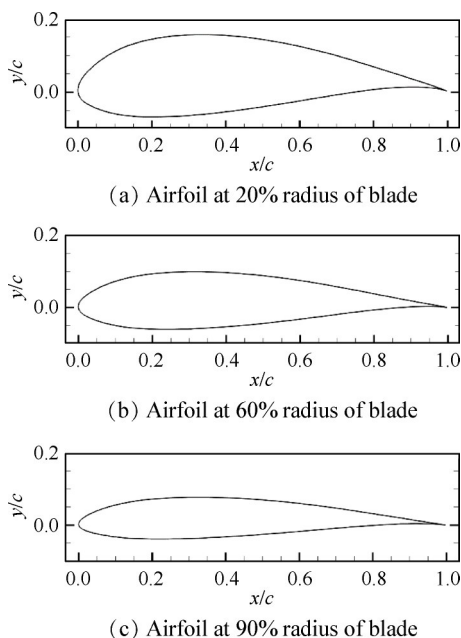
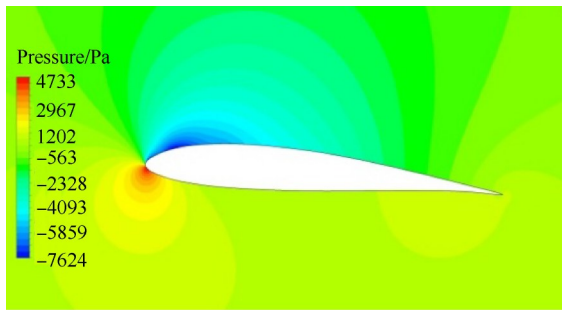


Fig. 1 Airfoils at different radius of propeller blade

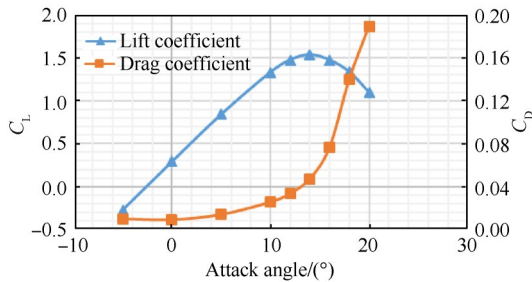
示未修正的升力系数, v_{Local} 为叶素的气流本地速度, $C_{L\text{potential}}$ 为势流的升力系数, C_{L3D} 表示修正后的升力系数。桨尖损失修正采用公式(2), 式中 B 表示螺旋桨桨叶数量, ϕ 表示翼型的入流角, F_{prandtl} 表示 Prandtl 翼尖修正函数。通过桨叶气动外形设计, 对不同桨叶半径处的翼型进行积叠、扭转、弯曲等变换后, 可以得到桨叶三维坐标数据和几何模型。

$$C_{L3D} = C_{L2D} + \frac{r}{R} \times \tanh \left[3.1 \times \left(\frac{\omega r}{v_{\text{Local}}} \right)^2 \times \left(\frac{c}{r} \right)^2 \right] \times (C_{L\text{potential}} - C_{L2D}) \quad (1)$$

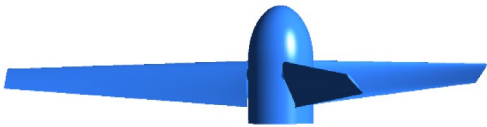
$$F_{\text{Prandtl}} = \frac{2}{\pi} \arccos \exp \left[\frac{B(R-r)}{R \sin(\phi(r))} \right] \quad (2)$$



(a) Pressure contour at 5° attack angle



(b) C_L and C_D vs attack angle at 75% radius of propeller



(c) Rotor propeller geometry model

Fig. 3 Sketch of the design of the rotor propeller

2.2 流动控制方程

旋翼螺旋桨流场计算中使用的控制方程为时均化的 Navier-Stokes 方程组, 在惯性笛卡儿坐标下, 当不考虑外加热源和体积力时, 积分形式的非定常 Navier-Stokes 方程组可写成如下形式

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V Q dV + \iint_{\partial V} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (3)$$

式中 $Q = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e)^T$ 为守恒量, $\rho, (u, v, w)$ 和 e

分别为密度, 直角坐标 (x, y, z) 下的速度分量和单位质量气体的总能量, t 表示时间; ∂V 为某一指定区域 V 的边界; $\mathbf{n}$ 为边界外法向量; 矢通量 $\mathbf{F}$ 包括对流通矢量和黏性矢通量; 湍流模型使用 SST 模型 (Shear stress transport)。

为了后续讨论方便, 下面给出用到的螺旋桨气动性能主要计算公式。

巡航效率

$$\eta_c = \frac{F_{\text{thrust}} v_0}{P_{\text{shaft}}} \quad (4)$$

悬停效率

$$\eta_H = \frac{F_{\text{thrust}}^{1.5}}{P_{\text{shaft}} \sqrt{2\rho A}} \quad (5)$$

前进比

$$J = \frac{v_0}{n_s D} \quad (6)$$

拉力系数

$$C_T = \frac{F_{\text{thrust}}}{\rho n_s^2 D^4} \quad (7)$$

功率系数

$$C_P = \frac{P_{\text{shaft}}}{\rho n_s^3 D^5} \quad (8)$$

式中 F_{thrust} 为螺旋桨拉力, v_0 为来流速度, P_{shaft} 为螺旋桨功率, ρ 为空气密度, A 为螺旋桨桨盘面积, n_s 为每秒钟螺旋桨转速, D 为螺旋桨直径, C_T, C_P, η_c, η_H 分别表示螺旋桨的拉力系数、功率系数、巡航效率和悬停效率。

2.3 计算方法及边界条件

本文的 CFD 计算中, 只涉及到轴向来流和悬停情况, 没有计算有侧风的倾转过渡过程, 因此, 螺旋桨的流动可以看成是准定常的流动。Ansys CFX 软件的多重参考坐标系方法 (MRF) 适用于该类流动的计算。将螺旋桨流场计算域分为旋转域和远场非旋转域两个部分。旋转区域与非旋转区域间设置界面, 进行数据的插值交换。空间离散格式均采用高精度格式 (High resolution)。

螺旋桨流场计算中的边界条件主要分为来流条件、远场条件, 以及固壁边界条件。在来流条件中, 根据飞行高度及飞行速度确定来流的总温和总压, 流动方向垂直于桨盘旋转面; 远场边界条件设置为开放型 (Opening), 湍流度设置为零梯度; 桨叶及桨毂均设置为无滑移绝热壁面条件, 初场设置为均匀来流。

2.4 网格无关性验证

旋翼螺旋桨的流场计算网格使用 Pointwise 软件进行划分,采用 T-Rex (Anisotropic tetrahedral extrusion) 网格生成方法,该方法能够比较快速、高效地生成包括边界层在内的高质量网格。计算域网格量的大小及网格的疏密可以通过网格布置点的数量、第一层网格厚度及边界层数进行调控。为保证计算对边界层粘性流动的分辨率,保证最大 Y^+ 小于 1.0。图 4 中显示了桨叶、桨毂表面的网格,以及包裹螺旋桨的旋转区域和整体计算域的网格。计算域周向直径为 7.5 倍螺旋桨直径,流场入口距螺旋桨为 10 倍螺旋桨直径,出口为 20 倍螺旋桨直径。

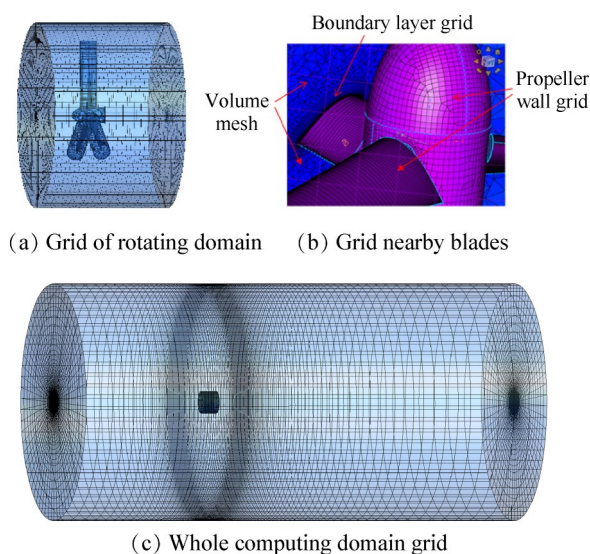


Fig. 4 Grid for rotor propeller flow field calculation

为尽量减小网格因素对计算准确度的影响,首先对螺旋桨流场进行了网格无关性计算研究,建立了 5 套不同疏密程度的网格,网格数分别为 54 万、101 万、236 万、591 万、816 万。图 5(a)显示了不同网格下拉力系数 C_T 随前进比 J 的变化,可以看出,拉力系数随前进比的增大而减小。在前进比恒定时,拉力系数随网格量的增大而略有增大,当网格量逐步增大时,因网格导致的计算结果差异逐步减小。图 5(b)显示了不同网格下功率系数 C_p 随前进比 J 的变化。图 5(c)显示了不同网格下螺旋桨巡航效率 η_c 随前进比 J 的变化情况,随着网格量由 54 万到 816 万,螺旋桨巡航效率的计算差异逐步减小,特别是 591 万和 816 万网格下的效率几乎相同了,这说明 591 万网格量已经达到了计算网格无关性要求。后续均选用 591 万网格下的 CFD 计算结果与风洞试验数据进行对比分析。

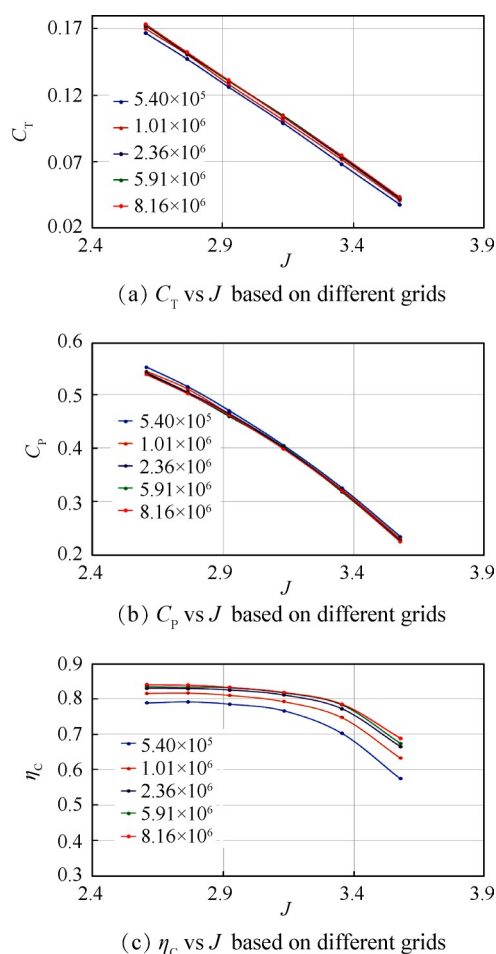


Fig. 5 Aerodynamic performance of rotor propeller vs grid amount

3 结果与讨论

3.1 旋翼螺旋桨悬停状态气动特性研究

旋翼螺旋桨在悬停工况下处于小桨叶角状态。图 6 为安装在试验台上的该螺旋桨。实验环境的绝对压强为 103474 Pa,空气密度为 1.17 kg/m^3 , 70% 桨叶半径处的桨叶角度为 17° 。试验中进行了 2000 ~ 3500 r/min 等多组转速的测试,通过对试验数据的处理,获得了该桨的悬停状态气动性能参数。表 1 中列出了不同转速下,几组典型的悬停工况中,螺旋桨的



Fig. 6 Rotor propeller in wind tunnel

气动性能参数,包括拉力系数 C_T ,功率系数 C_P 和悬停效率 η_H 。通过分析试验数据,可以看出该旋翼螺旋桨的悬停效率超过了 70%,而且高悬停效率的转速空间比较大,说明该旋翼螺旋桨在悬停工况下具有比较好的气动性能。

Table 1 Experimental values of C_T , C_P and η_H in hover state

$n/(r/min)$	C_T	C_P	η_H
2598	0.1331	0.0552	0.7022
2794	0.1339	0.0553	0.7071
3001	0.1341	0.0556	0.7053
3196	0.1347	0.0561	0.7033
3407	0.1351	0.0565	0.7010

图 7 显示了悬停工况下,CFD 计算的拉力系数 C_T ,功率系数 C_P 以及悬停效率 η_H 与试验数据的对比情况,从图中可以看出计算值略高于试验数据。整体来看,5 组工况点的拉力系数的平均计算误差为 2.0% 左右,功率系数的平均计算误差为 2.5% 左右,悬停效率的平均计算误差小于 1.0%。这说明了数值计算方法准确性比较好,计算网格也满足要求,能够很好地预测该旋翼螺旋桨的气动性能。图 8 为速度梯度张量第二不变量的等值面,由涡量和应变率张量构成,其显示了由于螺旋桨转动引起的漩涡强度。

3.2 旋翼螺旋桨巡航状态气动特性研究

旋翼螺旋桨在巡航工况下处于大桨叶角度状态,70% 桨叶半径处的桨叶角度为 59° 。图 9 反映了

巡航状态下拉力系数 C_T ,功率系数 C_P 随前进比 J 变化情况,从图中可以看出在较小前进比时,功率系数 C_P 的计算值高于实验值,在较大前进比时, C_P 的计算值略低于实验值,在设计点附近计算误差较小,约为 2.9%。5 个工况点的 C_P 平均计算误差为 5.5%。相比功率系数 C_P ,拉力系数 C_T 的 CFD 仿真结果与风洞实验数据符合得更好,设计点附近的计算误差为 0.3%,5 个工况点的平均计算误差为 3.1%。巡航效率 η_c 的设计点计算误差约为 2.2%,5 个工况点的平均计算误差约为 6.7%。图 10 为该螺旋桨在巡航工况下,速度梯度张量第二不变量的等值线分布情况,显示了桨尖引起的螺旋涡量形态。图 11 为设计巡航状态下,桨毂与桨叶的表面压力分布,以及在桨叶半径的 30%,60% 和 90% 位置上的桨叶壁面附近的流线分布情况。从压力及流线的分布来看,该螺旋桨在设计

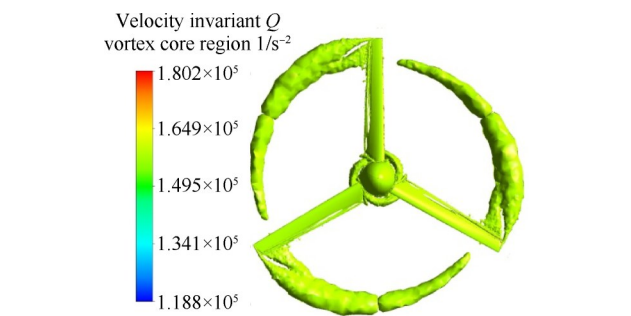


Fig. 8 Velocity gradient tensor second invariants isosurface in hovering state

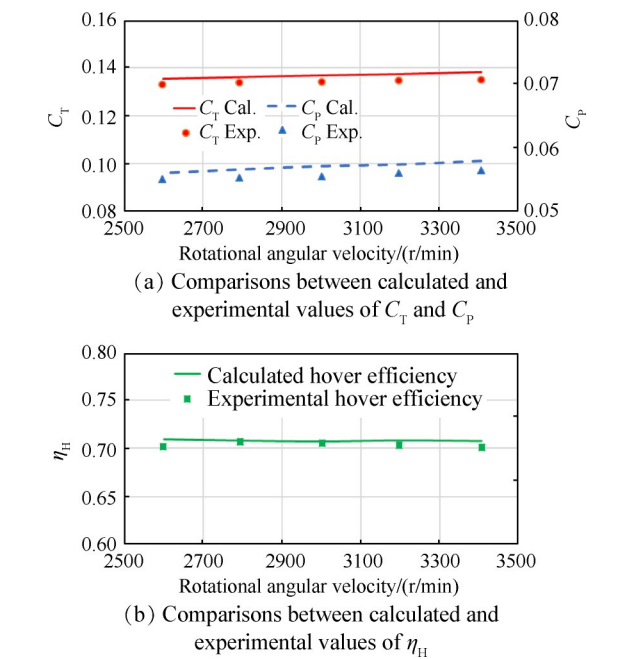


Fig. 7 Comparisons between calculated and experimental values of hovering aerodynamic performance

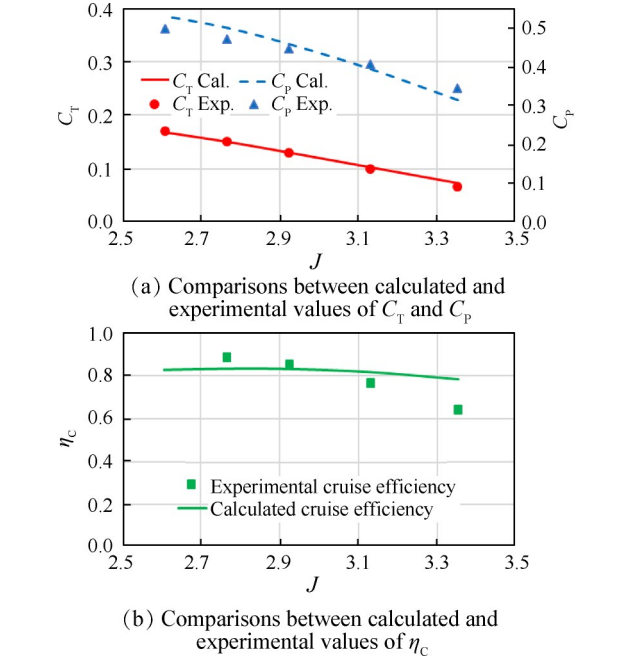


Fig. 9 Comparisons between calculated and experimental values of cruising aerodynamic performance

巡航状态点下,流动情况比较理想,没有大的分离产生,获得了较高的巡航效率。

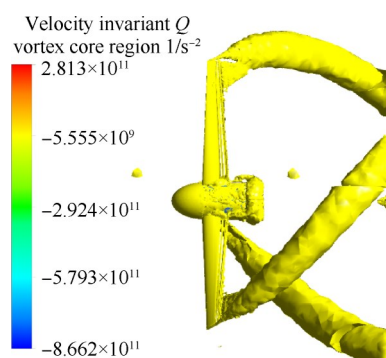


Fig. 10 Velocity gradient tensor second invariants isosurface in cruising state

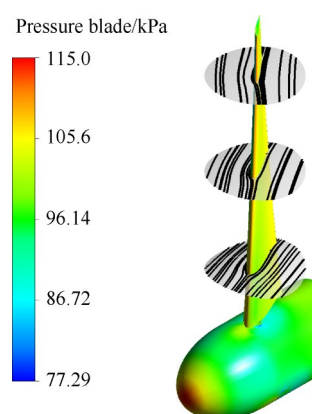


Fig. 11 Pressure and streamline distributions nearby the blades

4 结 论

本文采用结合CFD方法的叶素-动量组合理论,设计了一款旋翼螺旋桨,并进行了该螺旋桨的悬停和巡航工况下的CFD数值仿真及风洞试验验证,得到如下结论:

(1)本文使用的融合了CFD方法的叶素-动量理论,设计的旋翼螺旋桨具有较高的综合气动性能,设计点的巡航效率高于80%,悬停效率高于70%,气动设计准确可靠,达到了预期目标。

(2)数值计算中,网格的质量和数量会对旋翼螺旋桨的CFD计算产生重要影响,本文通过网格无关性研究确定了合适的网格量,保证了数值计算的准确性。

(3)本文采用的计算方法、离散格式、湍流模型等,在计算旋翼螺旋桨流场时具有较高的工程计算可信度,数值计算结果与试验吹风数据误差较小。

致 谢:感谢先进航空发动机创新工作站基金、北方工

业大学科研启动基金的资助;感谢中国航空工业集团有限公司空气动力研究院提供的试验数据支持。

参考文献

- [1] Kim H D, Perry A T, Ansell P J. A Review of Distributed Electric Propulsion Concepts for Air Vehicle Technology [C]. Cincinnati: 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, 2018.
- [2] Droandi G, Zanotti A, Gibertini G, et al. Experimental Investigation of the Rotor-Wing Aerodynamic Interaction in a Tiltwing Aircraft in Hover[J]. *Aeronautical Journal*, 2015, 119(1215): 591-612.
- [3] Gibertini G, Zanotti A, Campanardi G, et al. Wind-Tunnel Tests of the ERICA Tiltrotor Optimized Air-Intake [J]. *Aeronautical Journal*, 2018, 122(1251): 1-17.
- [4] Ye L, Zhang Y, Yang S, et al. Numerical Simulation of Aerodynamic Interaction for a Tilt Rotor Aircraft in Helicopter Mode[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(4): 843-854.
- [5] Droandi G, Syal M, Bower G. Tiltwing Multi-Rotor Aerodynamic Modeling in Hover, Transition and Cruise Flight Conditions[C]. Phoenix: AHS International 74th Annual Forum & Technology Display, 2018.
- [6] Ye Y, Thomson D, Anderson D. Dynamic Performance Investigation for Tilt-Rotor Aircraft[C]. Virginia Beach: The Vertical Flight Society's 76th Annual Forum & Technology Display, 2020.
- [7] 招启军, 蒋 霜, 李 鹏, 等. 基于CFD方法的倾转旋翼/螺旋桨气动优化分析[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(4): 544-553.
- [8] 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 Wen-hui, WANG Xue-chen, ZHOU Jun-wei, et al. Aerodynamic Interaction between Rotor Propeller and Wing in Cruise State[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(2): 290-297.)
- [9] Christian A, Ali E, Brian J, et al. A Surrogate-Based Multi-Disciplinary Design Optimization Framework Modeling Wing-Propeller Interaction [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 78: 721-733.
- [10] Waqas K, Meyer N. A Propeller Model for General Forward Flight Conditions[J]. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 2015, 3(2-3): 72-92.
- [11] Alexandre C P, Tomas G, Richard A, et al. Wake Energy Analysis Method Applied to the Boxprop Propeller Concept [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 79: 689-700.
- [12] Vigeveno L, Beaumier P, Decours J, et al. Tilt-Rotor Aerodynamics Activities During the NICETRIP Project

- [C]. Southampton: German Aerospace Center, 40th European Rotorcraft Forum, 2014: 1-14.
- [13] Andrejs K, Evgeny B, Sandris R, et al. Optimization Methodology of a Full-Scale Active Twist Rotor Blade [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 178(1): 85-95.
- [14] 贺军, 项松, 王艳冰, 等. 某型无人机螺旋桨的设计与气动性能分析[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(5): 1033-1039.
- [15] 项松, 王吉, 张利国, 等. 一种高效率螺旋桨设计方法[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(1): 136-141.
- [16] 郭佳豪, 周洲, 范中允. 一种耦合CFD修正的螺旋桨快速设计方法[J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 72-81.
- [17] 唐伟, 宋笔锋, 张玉刚, 等. 两个设计点的螺旋桨气动性能[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(2): 354-363.
- [18] 范中允, 周洲, 祝小平. 一种可任意给定环量分布的螺旋桨设计方法[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(2): 434-441.
- [19] 马率, 邱名, 王建涛, 等. CFD在螺旋桨飞机滑流影响研究中的应用[J]. *航空学报*, 2019, 40(4): 111-125.
- [20] Droandi G, Gibertini G, Grassi D, et al. Proprotor-Wing Aerodynamic Interaction in the First Stages of Conversion from Helicopter to Aeroplane Mode [J]. *Aerospace Science & Technology*, 2016, 58: 116-133.
- [21] 邓阳平, 米百刚, 詹浩, 等. 涵道螺旋桨地面效应试验与数值计算研究[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(5): 1038-1046.
- [22] 龚小权, 马明生, 张健, 等. 基于非结构重叠网格的螺旋桨滑流非定常数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(2): 345-354.
- [23] 廖鹏, 姚磊江. 基于最佳环量分布的螺旋桨滑流影响预测[J]. *推进技术*, 2019, 40(12): 2692-2699. (LIAO Peng, YAO Lei-jiang. Prediction of Propeller Slipstream Influence Based on Optimal Circulation Distribution [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(12): 2692-2699.)
- [24] Macneill R, Verstraete D. Blade Element Momentum Theory Extended to Model Low Reynolds Number Propeller Performance [J]. *Aeronautical Journal*, 2017, 121(1240): 835-857.

(编辑:梅瑛)