# 旋翼螺旋桨/机翼巡航状态气动干扰规律研究\*

闫文辉1,王雪晨1,周军伟2,王向阳3,杨 骁4

(1. 北方工业大学 机械与材料工程学院,北京 100144;
2. 哈尔滨工业大学(威海)船舶与海洋工程学院,山东 威海 264209;
3. 清华大学 航空发动机研究院,北京 100084;
4. 清华大学 精密仪器系,北京 100084)

摘 要:为优化倾转旋翼机气动布局,研究旋翼螺旋桨与机翼间复杂的气动干扰,在考虑有限翼展 三维效应、翼尖小翼情况下,通过改变机翼外翼段的长度,研究了旋翼螺旋桨与机翼间的气动干扰规 律。使用计算流体力学的三维非定常计算方法获得了巡航状态下旋翼螺旋桨与机翼的流场特征及气动特 性参数,研究了螺旋桨滑流对机翼的上洗、下洗作用,以及机翼对螺旋桨滑流的阻塞作用。计算结果表 明,随着机翼外翼段的增长,阻塞作用加大,螺旋桨的拉力系数、功率系数均有增大,并且存在周期性 波动,波动幅值在5%~6%;机翼受螺旋桨滑流上、下洗作用,其升力系数和阻力系数都减小,但升力 系数减小更为明显,升力系数和阻力系数都出现了1%左右的波动。计算同时也反映了有限翼展的三维 流动特点。

关键词:旋翼螺旋桨;计算流体力学;气动干扰;有限翼展机翼;数值模拟
中图分类号: V275 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 02-0290-08
DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200306

# Aerodynamic Interaction Between Rotor Propeller and Wing in Cruise State

YAN Wen-hui<sup>1</sup>, WANG Xue-chen<sup>1</sup>, ZHOU Jun-wei<sup>2</sup>, WANG Xiang-yang<sup>3</sup>, YANG Xiao<sup>4</sup>

School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
 School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China;

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

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

**Abstract**: The complex aerodynamic interaction between rotor propeller and wing was studied in order to optimize the aerodynamic configuration of a tiltrotor aircraft. In our present work, considering the effects of threedimensional finite wing and winglet, the aerodynamic interaction between rotor propeller and wing was studied by changing the length of outer wing section. The three-dimensional unsteady computational fluid dynamic method was used to obtain the flow field characteristics and aerodynamic performance of the rotor propeller and wing in cruise state. The upwash and downwash effects of the propeller slipstream on the wing and the blocking effect of

引用格式: 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.)

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-05-12;修订日期: 2020-07-15。

基金项目: 航空动力基金 (6141B09050397); 北方工业大学科研启动基金 (110051360002)。

作者简介: 闫文辉, 博士, 高级工程师, 研究领域为航空推进技术。E-mail: abuaa@163.com

通讯作者:周军伟,博士,副教授,研究领域为螺旋桨推进器性能、叶轮机设计及分析。E-mail: zhou\_junwei@foxmail.com

the wing at the downstream of propeller slipstream were studied. The results show that with the increase of the outer wing section, the blocking effect increases, and the thrust coefficient and power coefficient increase too. The periodic fluctuation amplitude of these coefficients is  $5\%\sim 6\%$ . The obvious up and down wash of propeller slipstream effects aerodynamics performance of wing, which causes the lift coefficient and drag coefficient of the wing decrease, and the decrease of the lift coefficient is more obvious. The lift coefficient and drag coefficient both appear around 1% fluctuations. In addition, the three–dimensional flow characteristics of the finite span wing are also presented.

Key words: Rotor propeller; Computational fluid dynamics; Aerodynamic interaction; Finite span wing; Numerical simulation

# 1 引 言

倾转旋翼机既具有常规直升机的垂直起降和悬 停功能,又具有固定翼螺旋桨飞机的较高巡航速度 和较大航程,主要得益于倾转旋翼螺旋桨系统的应 用。然而,由于倾转旋翼螺旋桨的使用也导致了一 系列复杂的问题出现,其中,倾转旋翼螺旋桨与机翼 间复杂的气动干扰问题就是影响倾转旋翼机研制成 功的关键因素之一。飞行器在巡航状态下,旋翼螺 旋桨滑流的上洗、下洗作用会产生明显的非定常现 象<sup>[1]</sup>,对机翼的来流攻角产生明显影响,进而影响机 翼的升阻特性,特别是机翼阻力特性[2]。螺旋桨与机 翼的气动干扰对经济环保同样影响重大,比如噪声 的预测和控制等[3]。螺旋桨的这些非定常滑流特 性<sup>[4]</sup>对性能的数学建模<sup>[5]</sup>以及高可信度 CFD 仿真<sup>[6]</sup>都 需要更先进的方法和手段来完成[7]。机翼的展向长 度以及螺旋桨相对于机翼的展向位置,螺旋桨的转 向<sup>[8]</sup>也会对飞行器巡航状态气动性能产生较大影响。 另外,为了减小旋翼螺旋桨下洗气流冲击机翼引起 的飞行器有效载荷下降,还要考虑将外侧小翼或者 内侧部分机翼设计成与旋翼螺旋桨共同倾转。由于 机翼在旋翼螺旋桨下游产生了一定的阻塞作用,螺 旋桨的气动性能也会产生比较明显的变化[9]。因此, 旋翼螺旋桨与机翼间存在着复杂气动干扰,这对二 者的气动特性都有很大影响。开展旋翼螺旋桨与机 翼气动干扰研究对掌握螺旋桨/机翼气动干扰规律, 设计优化飞行器的气动布局具有重要的现实 意义[10]。

螺旋桨/机翼气动干扰问题受到飞行器设计人员 的高度关注,研究者对此进行了比较丰富的研究,杨 永等<sup>[11]</sup>基于动态面搭接网格,使用非定常雷诺平均 Navier-Stocks方程方法模拟螺旋桨滑流与机翼的干 扰流动,发现机翼的出现破坏了螺旋桨滑流原有的 周期性,改变了其涡量分布,旋转的滑流改变了机翼 绕流的当地迎角,从而影响机翼的气动特性,且在小 前进比时影响更大;马东立等[12]针对太阳能无人机 分布式螺旋桨滑流问题,采用基于结构/非结构混合 网格的计算流体力学(CFD)方法进行了非定常数值 模拟,发现螺旋桨位于翼段前方或后方均使得翼段 升力、阻力、低头力矩增大并呈周期性波动,而翼段 的存在使得螺旋桨的拉力增大、吸收功率和效率提 高并呈周期性波动;林永峰等[13]针对倾转旋翼开展 了悬停及巡航状态气动特性的风洞试验和数值模拟 研究,获得了一些倾转旋翼悬停效率和巡航效率的 试验数据,采用运动嵌套网格方法开展了数值模拟, 并与风洞试验的相关性对比分析研究,获得了比较 一致的结论;招启军等[14]基于运动嵌套网格方法,针 对倾转旋翼的悬停、巡航、过渡飞行模式进行了数值 分析,说明了悬停状态下倾转旋翼相对于直升机旋 翼有更加明显的下洗流影响区域,巡航状态两旋翼 中心间距会对倾转旋翼气动干扰产生明显影响,过 渡状态下,倾转旋翼提供的拉力在倾转角为45°前下 降较快;孙俊磊等<sup>[15]</sup>使用动量源方法与k-kL-ω转捩 模型求解雷诺平均方程,对不同转速下菱形翼布局 无人机的气动特性进行了研究,结果表明随着螺旋 桨转速增大,小迎角下增升减阻效果明显。大迎角 时,前翼影响不变,后翼前缘下表面吸力区范围及强 度均减弱,前缘负升力区消失,增升效果改善,压差 阻力增大;姚磊江等[16]提出了基于最佳环量分布并 结合激励盘数值模拟技术实现螺旋桨滑流影响预测 的方法,选择Prandtl最佳环量分布解析法,并在此基 础上提出了一种桨毂修正办法,从而得到桨盘的最 佳环量分布解析式。结果表明,修正方法预测结果 更接近于试验数据,升力系数的相对误差不超过3%, 阻力系数的相对误差不超过20%;杨小川等[17]使用 雷诺平均 N-S方程结合 S-A 湍流模型方法,研究了某 分布式螺旋桨飞机低空低速大拉力状态下的有无滑 流全机气动特性分析,结果表明有滑流状态下升阻

力均较无滑流大,且有滑流较无滑流状态机翼低头 力矩大,尾翼抬头力矩较大,分布式螺旋桨直径相对 机翼厚度较大时引起升力系数增加并不显著;Vigevano等<sup>[18]</sup>重新设计了Erica倾转旋翼飞机气动布 局,并优化了螺旋桨气动外形,计算了螺旋桨/机翼/机 身气动干扰,并通过试验和计算验证了气动性能的 提高;Andrejs等<sup>[19]</sup>使用了先进的桨叶主动扭转控制 方法,优化设计了旋翼螺旋桨,通过仿真计算,发现 提高了螺旋桨的气动性能,并有效降低了噪声;Sudhakar等<sup>[20]</sup>对固定翼飞行器的螺旋桨诱导滑流及涡流 场的影响进行了实验研究,采用表面油流可视化方 法,捕捉了在螺旋桨关闭和螺旋桨开启条件下,机翼 表面的流动拓扑,并优化了机翼/螺旋桨气动布局。

本文基于雷诺平均非定常 Navier-Stocks 方程结 合 湍 流 模 型 法 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)研究旋翼螺旋桨/机翼气动干扰问题,该方法 考虑了工程实际中的可操作性、经济性与实效性,是 目前 CFD 主要方法之一。对流项采用高阶精度 Roe 通量差分分裂格式,扩散项采用二阶中心差分格式, 离散后的控制方程使用双时间步长推进法求解,湍 流模型使用 SST *k*-*ω*。本文对 Graupner E-prop 两叶 桨<sup>[21-22]</sup>进行了建模仿真,计算结果与试验结果进行了 比较,验证了计算方法的准确性。在获得验证的计 算方法及网格无关性研究基础上,对旋翼螺旋桨与 机翼气动干扰进行了计算,分析了不同外翼段长度 下螺旋桨滑流速度场,获得了螺旋桨的拉力特性、功 率特性和效率特性,以及机翼的升力系数、阻力系数 等在气动干扰下的变化规律。

### 2 流场计算方法及边界条件

#### 2.1 流动控制方程

本文计算中使用的控制方程为时均化的Navier-Stockes(N-S)方程,选取来流密度 p<sub>a</sub>、来流声速 a<sub>a</sub>、来 流静温 T<sub>a</sub>和螺旋桨直径 D 作为无量纲尺度。直角坐 标系无量纲非定常连续方程、动量方程、能量方程微 分形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_j} \left( \rho \boldsymbol{u}_j \right) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\boldsymbol{\rho} \boldsymbol{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_j} (\boldsymbol{\rho} \boldsymbol{u}_j \boldsymbol{u}_i + \boldsymbol{\rho} \delta_{ij}) = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_j} (\boldsymbol{\sigma}_{ij} + \boldsymbol{\sigma}_{ij \text{ turb}}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_{j}} \Big[ (\rho E + p) \mathbf{u}_{j} \Big] = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_{i}} \Big[ \mathbf{u}_{i} \Big( \mathbf{\sigma}_{ij} + \mathbf{\sigma}_{ij \text{ turb}} \Big) - \Big( \mathbf{q}_{j} + \mathbf{q}_{j \text{ turb}} \Big) \Big]$$
(3)

式中下标turb表示湍流。

对于理想气体,还需要补充状态方程,即

p

$$=\frac{1}{\gamma}\rho T \tag{4}$$

其中

$$E = e + \frac{1}{2} \boldsymbol{u}_i \boldsymbol{u}_i = c_p T - \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \boldsymbol{u}_i \boldsymbol{u}_i,$$
$$\boldsymbol{q}_j = -\kappa \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{x}_j}, \boldsymbol{q}_{j \text{ turb}} = -\kappa_{\text{turb}} \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{x}_j}$$

$$(T, \mu, \kappa, \kappa_{\text{turb}}) = (p/\rho R, KT^{0.72}, c_p \mu/Pr, c_p \mu_{\text{turb}}/Pr_{\text{turb}})$$

式中 $T, \mu, \kappa, R, K, c_p, Pr$ 分别表示温度、动力学黏 性系数、热传导系数、气体常数、比例常数、定压比热 容以及普朗特常数; $u, p, \rho$ 分别为速度,压力,密度;E为总能量; $\sigma_{ij}, \sigma_{ijuub}$ 分别为层流应力和湍流应力,湍 流应力项通过湍流模式计算出涡黏性系数之后 求得。

本文采用的湍流模式为两方程 SST  $k-\omega$ 模式。 SST  $k-\omega$ 模式是将  $k-\omega$ 模式和  $k-\varepsilon$ 模式结合起来,在 边界层区域采用  $k-\omega$ 模式,在边界层以外的区域采用  $k-\varepsilon$ 模式,模式方程见式(5)和式(6),式中各系数取 值参考文献[23]。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_{j}\frac{\partial k}{\partial x_{j}} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_{T}}{\sigma_{k}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_{j}}\right]\left(\frac{Ma_{x}}{Re}\right) + \frac{1}{\rho}P_{k}\left(\frac{Ma_{x}}{Re}\right) - \beta'\omega k\left(\frac{Re}{Ma_{x}}\right)$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial t} + u_{j}\frac{\partial\omega}{\partial x_{j}} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_{T}}{\sigma_{\omega}}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_{j}}\right]\left(\frac{Ma_{x}}{Re}\right) + \frac{1}{\rho}P_{\omega}\left(\frac{Ma_{x}}{Re}\right) - \beta\omega^{2}\left(\frac{Re}{Ma_{x}}\right) + \frac{2(1-F)\frac{1}{\sigma_{\omega_{x}}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_{j}}\frac{\partial\omega}{\partial x_{j}}\left(\frac{Ma_{x}}{Re}\right)$$

$$(5)$$

#### 2.2 计算方法及边界条件

本文研究的旋翼螺旋桨与机翼气动干扰问题的 计算域分为两部分:内部为带有螺旋桨的旋转区域, 外部为非旋转的固定外场区域,图1为计算网格示意 图,并在不同视角下进行了显示。本文使用Point-Wise软件划分网格,基于非结构化的混合网格生成 方法,采用T-Rex技术生成高质量的边界层网格,并 且通过调整第一层网格与物面间距来保证计算对黏 性的分辨率,最大 Y\*<1.0。远场区域使用 ICEMCFD 建立结构化网格。本文计算中使用了瞬态滑移网格 计算方法,旋转区域与非旋转区域间设置 Interface 进 行数据的插值交换。计算软件主要使用了 Fluent18.1 并与CFX软件进行了对比,其有限体积方法离散控 制方程保证了较好的守恒性,对流项采用高阶精度 Roe 通量差分分裂格式,扩散项采用二阶中心差分格 式,离散后的控制方程用双时间步推进法求解,物理 时间步的设置中,保证Courant数<5.0,本文计算中, 物理时间步长大约在螺旋桨旋转周期的5‰。湍流 模型使用 SST  $k-\omega$  模型。



Fig. 1

本文涉及的边界条件主要分为来流条件、远场 条件、固壁边界条件,以及对称边界条件。来流根据 飞行高度及飞行速度确定来流的总温和总压,以及 流动方向;远场边界采用基于黎曼不变量的无反射 边界条件;机翼、桨叶及桨毂等固体壁面均设置为无 滑移绝热壁面条件;计算对称平面上设置为对称边 界条件。非定常计算时的初场设置为定常计算获得 收敛解。

#### 2.3 计算方法验证

为了验证计算方法的准确可靠性,本文首先对 文献[21-22]中的 Graupner E-prop 螺旋桨进行了计 算,并与试验结果进行对比分析。Graupner E-prop 螺旋桨为多旋翼机用22.86cm两叶定距桨,几何模型 及网格如图2所示。试验与计算条件为:高度0m,转 速7500r/min,来流速度9m/s,气流与桨盘法线夹角为 0°,30°和60°,前进比J为0.32。图3中给出了螺旋桨 拉力系数C<sub>n</sub>和功率系数C<sub>n</sub>的实验值及本文的计算 值,通过对比,可以看出本文使用的计算网格和计算 方法准确性较好。

J=v/(nD)



Sketch of mesh and computational domain



293

Fig. 2 Model and mesh of Graupner E-prop propeller



Fig. 3 Comparison between calculated and experimental values of Graupner E-prop propeller

$$C_{\rm T} = T/(\rho n^2 D^4) \tag{8}$$

$$C_{\rm P} = F/(\rho n^3 D^5) \tag{9}$$

$$\eta = Tv/F \tag{10}$$

式中v表示来流速度(飞行速度),n表示螺旋桨 转速(每秒钟旋转圈数),D表示螺旋桨直径,T表示螺 旋桨拉力,F表示螺旋桨耗功, $\rho$ 表示当地空气密度, 本文计算中使用了巡航状态下的来流密度。

#### 旋翼螺旋桨/机翼气动干扰计算分析 3

为了研究旋翼螺旋桨与不同长度外段机翼气动 干扰的规律,本文计算了不同长度机翼外侧小翼情 况,图4显示了旋翼螺旋桨与机翼在巡航状态下的位 置关系和计算网格。以图4(a)为基准,从图4(b)~



(7)

(e),外侧T型翼增长了 50%,100%,150% 和 200%。 在 5 个计算模型中,旋转区域的大小是一样的,为了 尽量减小旋转区域周向滑移界面位置对计算结果的 影响,根据文献[24]的研究,"滑移界面越靠近转子, 转子转动对四周区域流体的影响越小;滑移界面越 靠近静止部件,转子转动对四周区域流体的影响越 大;滑移界面位置应取在转子和静止部件之间靠近 转子的 1/8~1/4处。"本文计算中考虑模型本身特点, 选择数值在 1/5 左右。在该巡航状态下,旋翼螺旋桨 前进比 J 为 3.12,来流马赫数 Ma 为 0.254,螺旋桨入流 角度  $\alpha$  为 0°,即来流方向垂直于桨盘旋转平面,桨距 角  $\theta_{0.75}$  为 57.4°,机翼攻角为 2.5°。

为了尽量减小网格对计算结果的影响,首先进行网格无关性研究,本文针对模型 I 建立了5 套计算 网格,网格数分别为65万,120万,245万,450万和 850万,图5显示了螺旋桨拉力系数及机翼阻力系数 C<sub>D</sub>随计算网格数的变化情况,可以看出,当网格数在 400万以上时,螺旋桨的拉力系数和机翼的阻力系数 计算值趋于平稳,不再有较大的变化,表明网格数量 对该旋翼螺旋桨/机翼气动干扰问题的分辨率满足要 求。本文后续计算均使用500万的计算网格。



Fig. 5 Propeller thrust coefficient and wing drag coefficient change with mesh

图 6 显示了旋翼螺旋桨的瞬时拉力系数 C<sub>r</sub>和瞬 时功率系数 C<sub>p</sub>在一个旋转周期内随时间的变化情况。在螺旋桨/机翼干扰计算中,螺旋桨的拉力和功 率是随时间变化的,利用瞬时拉力和功率即可计算 出瞬时的拉力系数和功率系数。本算例中,螺旋桨 转速为 600r/min。由于旋翼螺旋桨下游出现有限长 度翼展机翼及翼尖小翼,具有实际的三维效应。同 时,机翼对螺旋桨流动起到了一定的阻塞作用,并且 严重干扰了旋翼螺旋桨的滑流空间分布特性,导致 螺旋桨的拉力系数和功率系数出现小幅周期性波 动,并且随着机翼的增长,螺旋桨拉力系数和功率系 数波动幅值略微增大。另外,由于该旋翼螺旋桨具 有3个桨叶,所以一个旋转周期内出现3对峰值和谷 值。图7显示了螺旋桨平均拉力系数 $\bar{C}_{T}$ 和平均功率 系数 $\bar{C}_{P}$ 随着机翼外侧T型翼的增长幅度的变化规 律,可以看出随着机翼外侧T型翼的增长,机翼对旋 翼螺旋桨的干扰作用加大,拉力系数和功率系数都 呈现增大趋势。



Fig. 6 Variation of the  $C_{\rm T}$  and  $C_{\rm P}$  of the propeller vs time



Fig. 7 Variation of the average  $C_{\rm T}$  and average  $C_{\rm P}$  of the propeller vs growth rate of T wing

表1给出了计算获得的 $\bar{C}_{T}$ , $\bar{C}_{P}$ 和平均推进效率 $\bar{\eta}$ 具体数值,相对于平均值,拉力系数的波动范围约为 6%,功率系数的波动范围约为5%,同时,计算也发现 螺旋桨在巡航状态下的平均推进效率随着机翼的增 长也略微增大,这主要是因为机翼的增长对螺旋桨 的阻塞作用增加,螺旋桨的拉力会有所增大,这与文 献[11-12]得到的规律相一致。另外,表1也列出了 没有机翼干扰下的单独螺旋桨性能参数,可以看出,

Table 1 Average aerodynamic performance of propeller

Model	Ι	Ш	Ш	IV	V	No wing
$\bar{C}_{\mathrm{T}}$	0.0929	0.0930	0.0932	0.0934	0.0940	0.0898
$\bar{C}_{P}$	0.3580	0.3582	0.3585	0.3588	0.3600	0.3489
$ar\eta$	0.8505	0.8512	0.8519	0.8529	0.8551	0.8465

有机翼干扰情况下,螺旋桨受到的阻塞作用加大,螺 旋桨相应的特性参数均高于单独螺旋桨的计算值。

图 8 显示了螺旋桨附近的涡量分布云图,可以明 显看出桨尖涡旋转着向下游发展,在螺旋桨的周向 和桨叶附近涡量分布也比较明显。图 9 显示了桨叶 及桨叶/桨毂结合部位的表面流线分布情况,桨叶大 部分区域流动比较理想,因此其推进效率也比较高, 但在桨叶根部与桨毂结合部位存在着比较明显的分 离流动,这对螺旋桨的气动性能会产生一定的不利 影响。



Fig. 8 Distribution of vorticity around the propeller



Fig. 9 Distribution of streamlines around the propeller and wing

图 10显示了机翼升力系数 C<sub>L</sub>和阻力系数 C<sub>D</sub>随 时间的变化情况,可以看出由于机翼受到螺旋桨滑 流的影响,其升力系数和阻力系数都出现了一定的 波动,波动幅度很小,大概在1%左右。图11是计算 得到的不同模型的平均升力系数和平均阻力系数, 随着机翼外段T型翼的增长,升力系数和阻力系数都 在减小,但升力系数减小较为明显,阻力系数变化不 大,其主要原因在于外段T型翼处于螺旋桨滑流的下 洗流区域,随着T型翼的增长,下洗气流减小了该部 分机翼的有效气流攻角,使得机翼,特别是外段T型 翼偏离理想的工作状态较为明显,其升力系数有一 定的下降。

表2列出了各模型中机翼的平均升力系数、平均 阻力系数和平均升阻比,从升阻比数值的变化趋势



Fig. 10 Variation of lift coefficient and drag coefficient with time



Fig. 11 Variation of the average  $C_{\rm L}$  and average  $C_{\rm D}$  of the wing vs growth rate of T wing

也可以看出,随着机翼的加长,升阻比稍微下降。另 外,比较模型III中机翼在有无螺旋下的升阻特性,螺 旋桨滑流的出现会导致机翼升力、阻力以及升阻比 的略微增加。

Table 2 Average aerodynamic performance of wing

Model	Ι	Ш	Ш	IV	V	III (No propeller)
$\bar{C}_{\mathrm{L}}$	0.1627	0.1608	0.1593	0.1586	0.1569	0.1581
$\bar{C}_{\mathrm{D}}$	0.00741	0.00740	0.00738	0.00736	0.00734	0.00735
$\bar{C}_{\rm L}/\bar{C}_{\rm D}$	21.96	21.74	21.58	21.54	21.39	21.51

图 12显示了机翼表面压力分布及表面流线分 布,由于螺旋桨的旋转作用,其滑流对内侧机翼产生 上洗作用,对外侧机翼产生下洗作用,从而使得内侧 机翼上表面压力更低,外侧机翼上表面压力略高。 另外,由于螺旋桨桨毂的影响,在螺旋桨后方正对机 翼的部分,流线弯曲明显。由于目前计算模型没有 使用螺旋桨桨毂与机翼进行连接过渡,该处机翼部 分的流动状态及升阻特性与实际流动存在一定偏 差,后续研究将进行补充完善。图 12还显示了三个 沿机翼展向不同位置的截面,分别是内侧翼截面(受 上洗气流作用),螺旋桨轴线后截面和外侧翼截面 (受下洗气流作用)。图 13 给出了机翼上这三个不同 截面位置的压力系数分布情况,横坐标中的 c 代表翼 型弦长。可以看出三个压力系数有明显的不同,特 别是外侧机翼截面的压力系数中,机翼压力面与吸 力面的压力系数曲线相交,显示在机翼的前缘部分 存在着一部分区域,在该区域中由于螺旋桨下洗气 流的作用,导致吸力面压力高于压力面压力,有一定 的负升力产生,对机翼升力产生了不利影响,从而使 得外侧机翼部分的升阻特性变差。



Fig. 12 Pressure contours and streamlines around wing



Fig. 13 Pressure coefficient distribution on different sections of the wing

### 4 结 论

本文使用基于 RANS 的 CFD 方法对旋翼螺旋桨 与机翼的气动干扰进行了研究和分析,特别针对不 同外翼段长度对旋翼螺旋桨/机翼气动干扰进行了细 致研究,可以得到如下结论:

(1)旋翼螺旋桨下游的有限翼展机翼对螺旋桨 流动起到了一定的阻塞作用,导致螺旋桨的拉力系 数和功率系数出现随时间的小幅周期性波动,波动 幅度大约为5%~6%,旋翼螺旋桨平均拉力系数C<sub>τ</sub>、功 率系数C<sub>p</sub>以及推进效率η随着外侧机翼的增长而增 大,并且都大于单独螺旋桨时相应参数。

(2)机翼受到螺旋桨滑流上洗、下洗作用的影响,其升力系数和阻力系数都出现了微小波动,波动 幅度为1%左右。随着外段机翼的增长,平均升力系数 *C*<sub>L</sub>和阻力系数*C*<sub>D</sub>都减小,但外段翼受下洗气流作 用较强,导致升力系数减小更加明显。

当前模型没有考虑桨毂与机翼的实际连接过

渡,机翼的受干扰流动与实际情况存在一定偏差,后 续将针对螺旋桨/桨毂/机翼整体模型进行研究。 致 谢:感谢航空动力基金和北方工业大学科研启动基 金的资助、北方工业大学提供的相关计算设备支持、航 空发动机研究院薜然然老师在 Pointwise 等网格划分软

件上提供的技术指导。

# 参考文献

- Bousquet J M, Gardarein P. Improvements on Computations of High Speed Propeller Unsteady Aerodynamics
   [J]. Aerospace Science and Technology, 2003, 7(6): 465-472.
- [2] Roosenboom E, Stuermer A, Schröder A. Advanced Experimental and Numerical Validation and Analysis of Propeller Slipstream Flows [J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(1): 284-291.
- [3] Stuermer A. Validation of URANS-Simulations of Contra-Rotating Open Rotor-Powered Aircraft at Take-Off Conditions[R]. AIAA 2018-1265.
- [4] 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.
- [5] 陈怀荣,王 曦.基于部件特性的螺旋桨数学模型通用建模算法[J].推进技术,2019,40(8):1681-1692.
  (CHEN Huai-rong. WANG Xi. General Modeling Algorithm for Propeller Mathematical Model Based on Component Characteristics[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(8):1681-1692.)
- [6] 许和勇, 叶正寅. 螺旋桨非定常滑流数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 148-153.
- [7] 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.
- [8] 杨小川,王运涛,孟德虹,等.不同分布式螺旋桨转向组合下的机翼滑流效应研究[J].空气动力学学报, 2019,37(1):89-98.
- [9] 周 盛,顾高墀,潘杰元,等.航空螺旋桨与桨扇[M].北京:国防工业出版社,1994.
- [10] 陈怀荣,王 曦.一种基于螺旋桨部件特性的螺旋桨
   建模方法[J]. 航空动力学报,2017,32(10):2526-2535.
- [11] 夏贞锋,杨 永.螺旋桨滑流与机翼气动干扰的非定 常数值模拟[J]. 航空学报, 2011, 32(7): 1195-1201.
- [12] 乔宇航,马东立,李 陟.螺旋桨/机翼相互干扰的非 定常数值模拟[J].航空动力学报,2015,30(6): 1366-1373.
- [13] 李尚斌,林永峰,樊 枫. 倾转旋翼气动特性风洞试 验与数值模拟研究[J]. 工程力学, 2018, 35(6): 249-

256

- [14] 李 鹏,招启军. 倾转旋翼典型飞行状态气动特性的 CFD分析[J]. 航空动力学报,2016,31(2):421-431.
- [15] 孙俊磊,王和平,周 洲,等.螺旋桨滑流对菱形翼 布局无人机气动的影响[J].航空学报,2018,39(1): 136-149.
- [16] 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.)
- [17] 杨小川,王运涛,王光学,等.螺旋桨非定常滑流的 高效数值模拟研究[J]. 空气动力学学报,2014,32
   (3):289-294.
- [18] Vigevano L, Beaumier P, Decours J, et al. Tilt-Rotor Aerodynamics Activities During the NICETRIP Project
   [C]. Southampton: 40th European Rotorcraft Forum, 2014.

- [19] 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.
- [20] Sudhakar S, Chandankumar A, Venkatakrishnan L. Influence of Propeller Slipstream on Vortex Flow Field over a Typical Micro Air Vehicle [J]. The Aeronautical Journal, 2017, 121: 95-113.
- [21] Theys B, Dimitriadis G, Andrianne T, et al. Wind Tunnel Testing of a VTOL MAV Propeller in Tilted Operating Mode [C]. Orlando: International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2014.
- [22] Khan W, Nahon M. A Propeller Model for General Forward Flight Conditions[J]. International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2015, 3(2): 72-92.
- [23] Menter F, Rumsey C. Assessment of Two-Equation Turbulence Models for Transonic Flows [R]. AIAA 94-2343.
- [24] 王文全,郝栋伟,张立翔.滑移界面位置对叶轮机械内部旋转流场的影响[J].北京理工大学学报,2012, 32(9):890-894.

(编辑:朱立影)