

改善装机条件下太阳能无人机的气动性能*

李文科¹, 涂良辉¹, 赵昌霞², 刘传超², 苏文涛¹, 卢俊¹, 刘吉禹¹

1. 南昌航空大学航空宇航学院, 江西 南昌 330063

2. 安徽羲禾航空科技有限公司, 安徽 合肥 230088

摘要: 研究了改善装机条件下的太阳能无人机的性能。首先, 采用单独螺旋桨的缩比模型, 通过风洞试验验证了本文所选数值模拟方法的准确性; 其次, 采用定常和非定常的数值模拟方法, 计算了螺旋桨安装位置和单独螺旋桨、带机翼螺旋桨两种构型对螺旋桨性能的影响, 以及改善装机条件下螺旋桨对无人机性能的影响。研究表明: 带机翼螺旋桨相比于单独螺旋桨的推力、功率等均增加; 螺旋桨滑流对短舱影响很小, 主要是滑流加速导致短舱阻力少许增加。螺旋桨滑流导致无人机机翼升力曲线斜率降低、阻力增加, 俯仰稳定性增加。随着螺旋桨距离无人机机翼前缘的距离的增大, 带机翼螺旋桨的性能逐渐趋近于单独螺旋桨的性能。

关键词: 太阳能无人机; 气动性能; 单独螺旋桨; 带机翼螺旋桨; 螺旋桨滑流; 数值模拟

中图分类号: V411 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)03-0148-08

The influence of improved installed propeller on the solar UAV aerodynamic performance

LI Wenke¹, TU Lianghui¹, ZHAO Changxia², LIU Chuanchao², SU Wentao¹, LU Jun¹, LIU Jiyu¹

1. School of Aeronautics and Astronautics, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

2. Anhui Xihe Aviation Technology Company Limited, Hefei 230088, China

Abstract: The performance of the solar UAV propeller under the improved installed condition is studied. Firstly, wind tunnel test is carried out to verify the accuracy of the numerical simulation method choosed in this paper in the case of the installation of a separate propeller. Secondly, the effects of the propeller installation position, the individual propeller and the winged propeller on the performance of the propeller were calculated by using the constant and unsteady numerical simulation methods, and the influence of the improved propeller on the performance of the UAV was calculated. The results show that the winged propeller causes the propeller thrust and power to increase, and the propeller slipstream has little effect on the nacelle, mainly due to the acceleration of the slipstream leading to a slight increase in drag. Propeller slipstream results in lower UAV wing lift curve slope, higher drag and higher pitch stability. As the distance between the propeller and the leading edge of the wing increases, the performance of the winged propeller gradually approaches that of the propeller without the wing.

Key words: solar UAV; aerodynamic performance; the individual propeller; the winged propeller; propeller slipstream; numerical simulation

* 收稿日期: 2024-11-26

录用日期: 2024-12-06

网络首发日期: 2025-01-24

基金项目: 江西省重点研发计划(20243BBG71006)

作者简介: 李文科(1998年生), 男; 研究方向: 空气动力学; E-mail: liwenke0223@163.com

通信作者: 涂良辉(1981年生), 男; 研究方向: 空气动力学; E-mail: 71016@nchu.edu.cn

全文阅读



ZR20240337

随着通用飞行器和无人机的快速发展,螺旋桨作为高空长航时无人机的主要动力形式,成为了各国研制的热点(刘沛清,2006)。高空太阳能无人机处于临近空间,即高度在20~100 km的空域。临近空间空气稀薄、密度低、湍流粘性强,使得高空太阳能无人机处于低雷诺数的工作环境,螺旋桨的性能严重下降,并且螺旋桨滑流与飞机之间的气动干扰相对复杂。这种情况下,太阳能无人机的气动布局设计和性能分析成为了很大的难题(Roosenboom et al.,2010;Stuermer et al.,2005)。

针对螺旋桨的滑流,国内外都有相关的研究。西北工业大学张刘等(2012)和徐家宽等(2014)对螺旋桨滑流/机翼之间的气动干扰进行了研究,研究表明螺旋桨滑流影响最严重的部位是机翼前缘,随着迎角的增加,滑流对机翼的影响逐渐减小。吴浩等(2024)和马率等(2019)采用测试台实验方法,以螺旋桨-机翼为研究对象,验证了多参考系方法与定常数值模拟方法的正确性和可行性。王科雷等(2017)和王红波等(2015)基于多重参考系方法和混合网格技术以及 $k-\varepsilon$ 转捩模型三种方法,对螺旋桨-机翼构型的低雷诺数气动特性进行了数值模拟,研究表明螺旋桨滑流使其桨叶后方的流速增大,导致机翼升力增大、升阻比降低。程晓亮等(2011)应用多参考系和滑移网格边界条件对模型进行了数值模拟,分析了不同转速下滑流对机翼的影响。李博等(2008)建立了考虑桨叶形状、桨叶角、三维效应等因素的等效盘模型,并利用模型代替真实桨研究了滑流对全机气动力的影响。Khier(2006)和Bousquet et al.(2003)利用非定常数值模拟方法,模拟了螺旋桨滑流和机翼之间的流动机理,并和工程算法进行了对比。邓磊等(2019)和杨小川等(2014)采用动态拼接网格和双时间步推进的方法,对螺旋桨进行了非定常的数值模拟,研究表明螺旋桨滑流对飞机的气动性能影响明显。孙宗燕等(2024)基于运12F飞机,从螺旋桨的桨盘面积、螺旋桨与电机的匹配关系以及螺旋桨的重量入手开展了螺旋桨的设计,结果表明分布式螺旋桨滑流在小速度、大迎角下增升作用更明显。研究结果可为飞机起飞及爬升阶段性能的提升提供理论参考。饶崇等(2021)提出了一种分布式电推进螺旋桨飞机,并采用数值模拟得到了分布式飞机的螺旋桨滑流对飞机性能的影响规律。结果表明,螺旋桨滑流增加了飞机的升力和阻力,升力系数得到了很大的提升,并且随迎

角的增加而增大。

尽管如此,对改善装机条件下的太阳能无人机气动性能的研究却较少。因此,本文基于数值模拟方法研究了太阳能无人机及其改装螺旋桨的相互影响作用。首先,通过风洞试验验证了本文数值模型结果的准确性以及吻合性;然后,得到了螺旋桨的安装位置对螺旋桨的推力、功率和效率的影响;最后,分析了不同构型的螺旋桨的性能以及不同工况条件下螺旋桨对无人机气动性能的影响。

1 计算模型与数值模拟方法

1.1 计算模型

螺旋桨通过短舱安装在无人机机翼前部,因此无人机上对螺旋桨影响最大的部件就是无人机机翼和短舱,使用靠近螺旋桨的翼段和短舱代替全机,评估螺旋桨的性能。如图1所示,螺旋桨安装到吊舱前部,单独螺旋桨和带机翼螺旋桨旋转平面距离前部端面100 mm。

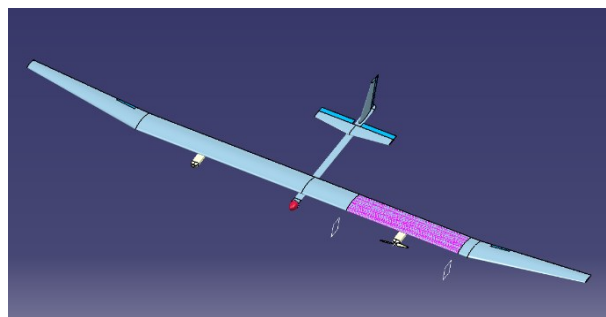


图1 改装螺旋桨的几何模型

Fig. 1 Geometric model of improved installed propeller

1.2 数值模拟方法

通过求解RANS方程,采用非定常和定常计算方法对流场进行数值模拟。非定常数值模拟过程中,控制方程采用雷诺平均N-S方程。在流场求解中,控制方程采用格心格式的有限体积法进行空间离散,粘性项采用中心差分格式离散,无粘性项采用Roe三阶迎风偏置通量差分格式离散(高飞,2017;Thomas et al.,1990)。定常模拟时,时间离散采用隐式近似因子分解法(简称AF方法)。

1.3 网格无关性验证

采用非结构网格对螺旋桨的外形以及流场进行网格划分,旋转域为螺旋桨,静止域包含无人机机翼、短舱。计算域为长方体体计算域,旋转域直径比桨叶直径大5%,计算域直径为旋转域直

径的 15 倍, 入口边界取旋转域直径的 10 倍, 出口边界距离旋转域的长度为 15 倍的旋转域直径(吴浩等, 2024)。如图 2 所示, 第一层网格物面距离为 1.0×10^{-6} m, 满足 $y^+ = 1$, 对桨叶前后缘和无人机机翼的前后缘进行网格加密处理, 总网格数量为 1 600 万, 其中旋转域网格数量为 1 100 万, 静止域网格数量为 500 万。

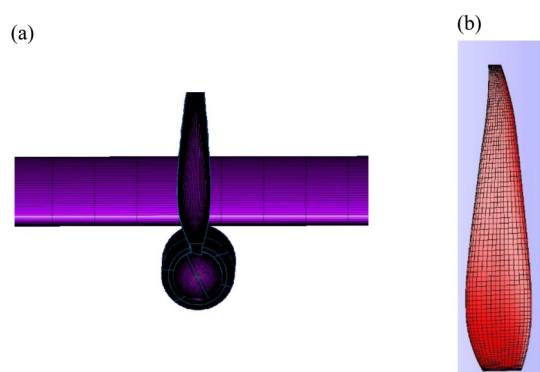


图 2 几何模型网格示意图

Fig. 2 Grid diagram of geometric model

设置 6 套稀疏不同的全局网格, 计算某特定工况下一个周期内的时均力与扭矩, 通过换算得到效率作为监测目标(聂波等, 2025)。如图 3 所示, 螺旋桨的效率在网格为 1 600 万之后基本趋于稳定, 综合考虑计算量和监测目标, 最终选用的总网格数量为 1 600 万, 其中旋转域网格数量为 1 100 万, 静止域网格数量为 500 万。

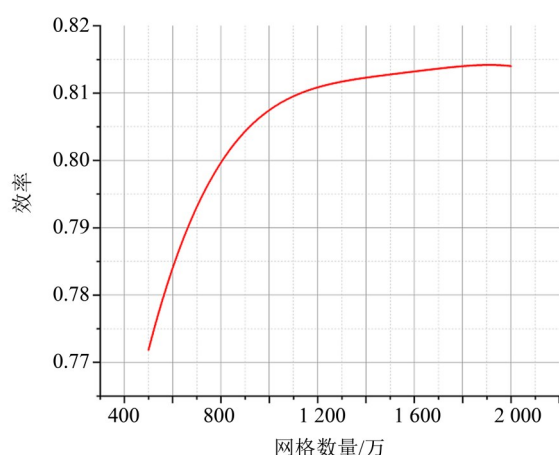


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

1.4 试验验证

由于高空空气稀薄、运动粘度系数较大, 使得高空螺旋桨处于低雷诺的工作环境。试验验证

在西北工业大学的 LTWT 风洞进行, 该风洞是具有国际先进水平的低速极低湍流度研究型风洞。吹风试验在风洞的三元试验段, 三元试验段的尺寸为 $1.05 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ (高 \times 宽), 试验模型如图 4 所示。

试验使用碳纤维缩比螺旋桨, 螺旋桨的构型为单独螺旋桨, 螺旋桨直径为 0.6 m, 试验工况如表 1 所示。图 5~6 分别为工程算法、数值模拟和实验中的功率系数和效率。从图中可以看出, 螺旋桨的各项气动特性的数值模拟结果和实验值非常接近。因此, 本文采用的数值模拟方法可以用来模拟低雷诺数螺旋桨的气动特性。

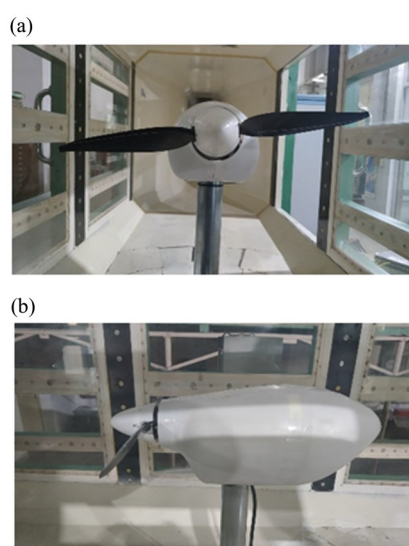


图 4 风洞试验示意图

Fig. 4 Diagram of wind tunnel test

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

序号	海拔/km	空气速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	12	17.28	1 200
2	16	23.68	1 450
3	20	32.46	1 850
4	22	38.16	2 200
5	25	48.45	2 400

2 螺旋桨安装位置对性能的影响

2.1 计算工况

本节中, 评估螺旋桨安装位置对性能的影响。结合无人机总体需求, 选取海拔为 21 km, 空气速度为 35.2 m/s, 转速为 1 650 r/min 的典型工况, 评估螺旋桨距离无人机机翼前缘 1.0~2.0 m 时螺旋桨的性能变化。

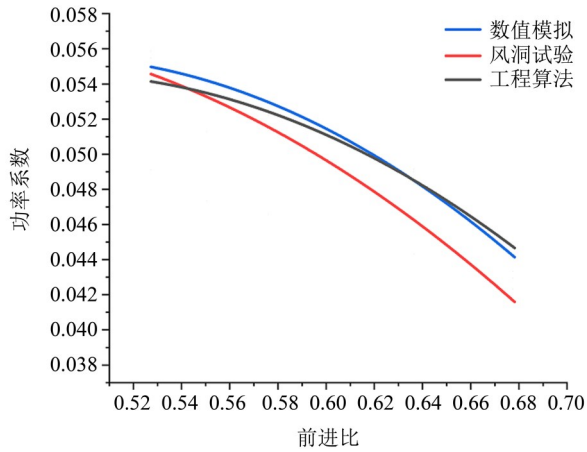


图5 工程算法, 数值模拟和风洞实验中的功率系数

Fig. 5 Power coefficients in engineering algorithms, numerical simulations calculations, and wind tunnel experiments

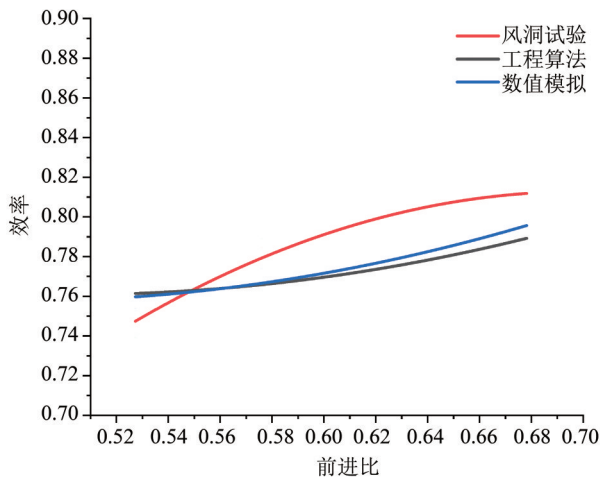


图6 工程算法, 数值模拟和风洞实验中的效率

Fig. 6 Efficiency in engineering algorithms, numerical simulations calculations and wind tunnel experiments

2.2 结果与分析

图7~9是螺旋桨的推力、功率和效率随螺旋桨安装位置的变化情况。从图中可以看出,随着螺旋桨距无人机机翼的距离增大,螺旋桨的推力、功率和效率均呈现下降的趋势;且,随着螺旋桨距无人机机翼的距离进一步地增大,带机翼螺旋桨的推力、功率和效率逐渐趋近单独螺旋桨的结果。

3 螺旋桨构型对性能的影响

3.1 计算工况

根据太阳能无人机机翼和吊舱外形,将设计的螺旋桨安装到吊舱前部,螺旋桨旋转平面距离前部端面0.1 m(距离无人机机翼前缘1 m),选择单独螺旋桨和带机翼螺旋桨两个构型,计算螺旋桨的推力和效率等。计算工况如表2所示。

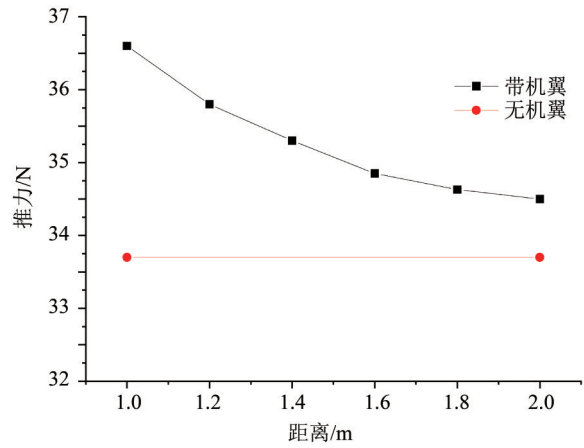


图7 螺旋桨安装位置对推力的影响

Fig. 7 Effect of propeller installation position on its thrusting force

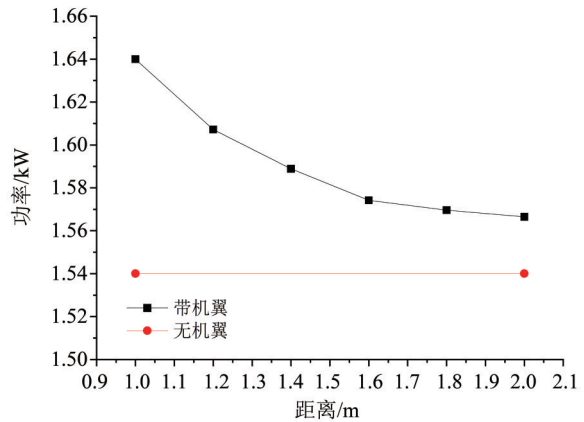


图8 螺旋桨安装位置对功率的影响

Fig. 8 Effect of propeller installation position on its power

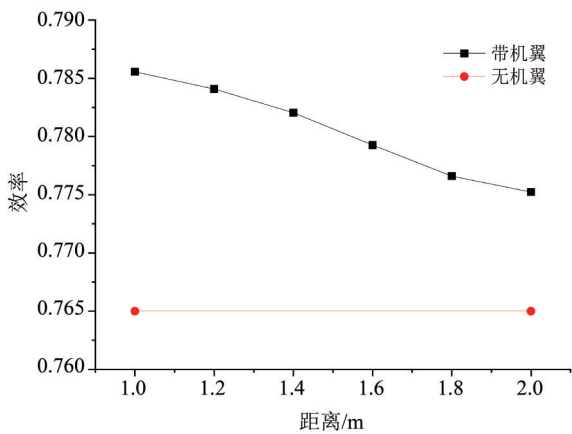


图9 螺旋桨安装位置对效率的影响

Fig. 9 Effect of propeller installation position on its efficiency

3.2 结果与分析

考虑到无人机机翼和螺旋桨的相互影响会导致气动力周期性变化,采用非定常方式进行计算,气动力进行时均化处理;并将单独螺旋桨的非定

表 2 典型计算工况

Table 2 The typical calculation conditions

序号	海拔/(km)	空气速度/(m·s ⁻¹)	转速/(r·min ⁻¹)
1	12	17.28	850
2	21	35.20	1 650

常计算结果与定常计算结果进行比较。图 10~15 是单独螺旋桨以及带机翼螺旋桨的推力、扭矩和效率随时间的变化曲线。从图中可以看出,带机翼螺旋桨的推力、扭矩和效率在总共经历 2 个计算周期后,计算结果已经收敛。

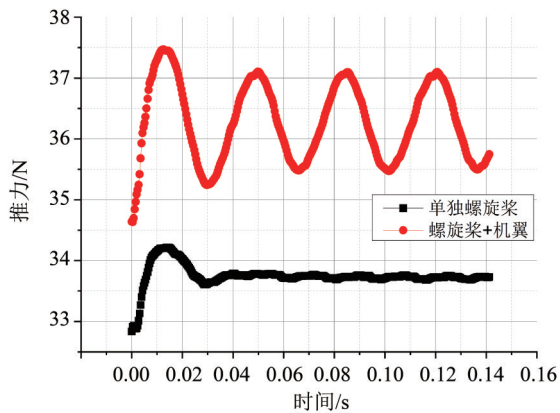


图 10 海拔 12 km 时带机翼螺旋桨的推力
Fig. 10 The thrust force of the winged propeller when altitude is 12 km

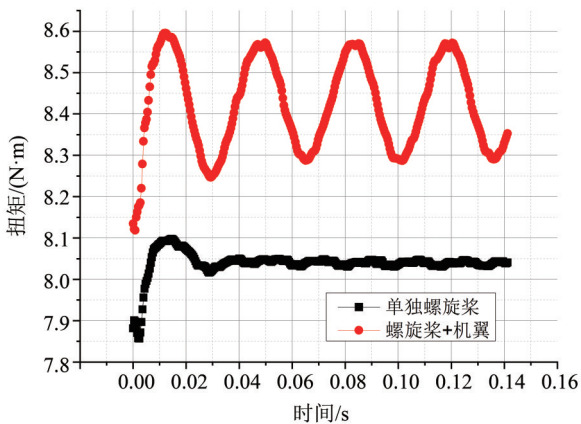


图 11 海拔 12 km 时带机翼对螺旋桨扭矩的影响
Fig. 11 The torque of winged propeller when altitude is 12 km

表 3~5 是单独螺旋桨和带机翼螺旋桨的性能计算结果。从图 10~15 和表 3~5 可以得到如下结论:

(1) 对单独螺旋桨而言,非定常计算的推力和扭矩比定常计算结果略大,在海拔为 12 km 的工况点非定常计算的效率较高,在海拔为 21 km 的工

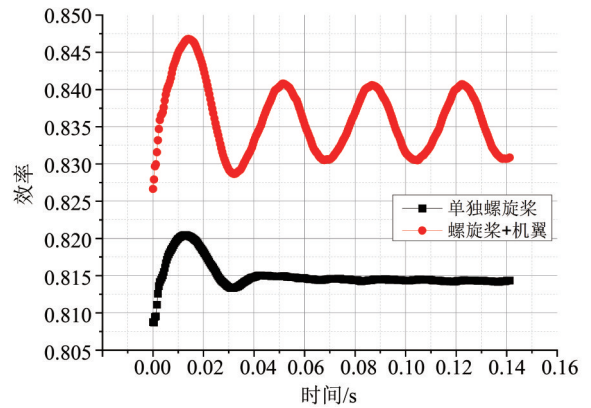


图 12 海拔 12 km 时带机翼对螺旋桨效率的影响
Fig. 12 The efficiency of winged propeller when altitude is 12 km

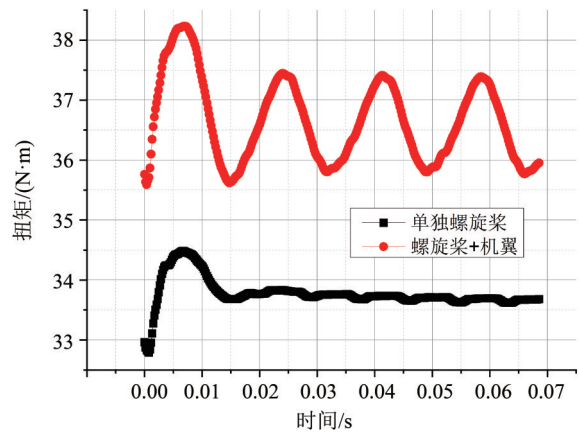


图 13 海拔 21 km 时带机翼螺旋桨的推力
Fig. 13 The thrust force of winged propeller when altitude is 21 km

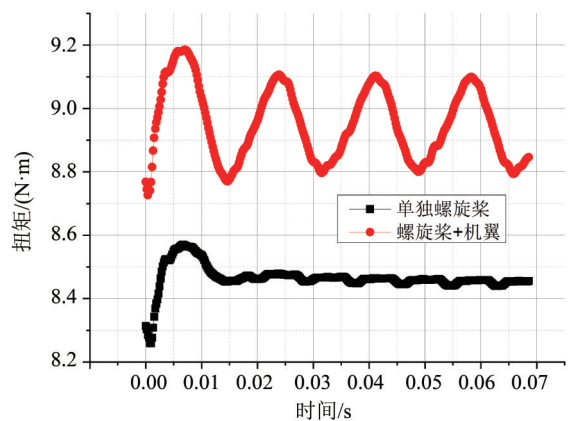


图 14 海拔 21 km 时带机翼螺旋桨的扭矩
Fig. 14 The torque of winged propeller when altitude is 21 km

况点定常计算的效率较高。

(2) 带机翼螺旋桨的推力、扭矩和效率都会增加。主要原因是机翼阻塞作用导致螺旋桨当地

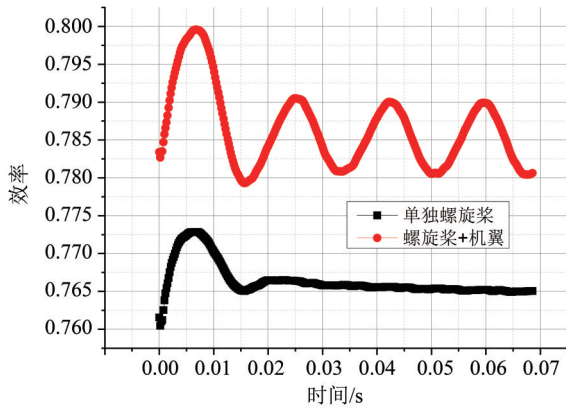


图15 海拔21 km时带机翼螺旋桨的效率
Fig. 15 The efficiency of the winged propeller when altitude is 21 km

来流速度减小, 所以推力、扭矩和功率均增大。由于计算螺旋桨效率的来流速度为无穷远流, 该速度要大于受到机翼影响后螺旋桨所在位置的当地速度, 因此造成螺旋桨名义效率上升, 但实际效率不一定上升。

表3 定常方法下单独螺旋桨的性能
Table 3 Performance of individual propeller by stationary method

工况	推力/N	功率/kW	效率	力效/(g · W ⁻¹)
1	31.1	0.67	0.802 3	4.74
2	33.1	1.470	0.792 3	2.29

表4 非定常方法下单独螺旋桨的性能
Table 4 Performance of individual propeller by unstationary method

工况	推力/N	功率/kW	效率	力效/(g · W ⁻¹)
1	33.7	0.67	0.814	5.13
2	33.7	1.54	0.765	2.23

表5 非定常方法下带机翼螺旋桨的性能
Table 5 Performance of winged propeller by unstationary method

工况	推力/N	功率/kW	效率	力效/(g · W ⁻¹)
1	31.1	0.67	0.802 3	4.74
2	33.1	1.470	0.792 3	2.29

4 不同螺旋桨运行工况对无人机气动性能的影响

4.1 计算工况

由于螺旋桨安装在机翼前部, 受到螺旋桨滑

流影响最大的部件是短舱和机翼, 因此计算动力系统(螺旋桨)对机翼、螺旋桨和短舱三个部件的影响, 以代替动力系统对全机性能影响。选择螺旋桨旋转(转速1 650 r/min)和螺旋桨不旋转两种状态, 计算工况如表6所示。

表6 螺旋桨的计算工况
Table 6 Calculation state of propeller

序号	海拔/km	空气速度/(m · s ⁻¹)	转速/(r · min ⁻¹)	侧滑角/(°)
1	20	33.33	0	0
2	20	33.33	1 650	0
3	20	33.33	0	5
4	20	33.33	1 650	5

4.2 结果与分析

螺旋桨未旋转工况采用定常计算模型, 螺旋桨旋转的工况采用非定常计算模型。图16~21是无人机机翼和短舱在有无动力情况下的性能对比。从图中可以看出, 在动力系统的影响下无人机机翼升力曲线斜率反而降低。由于动力系统滑流方向与无人机机翼角度固定, 在迎角增加的时候, 滑流导致无人机机翼的当地迎角未达到自由来流迎角, 所以升力反而降低。

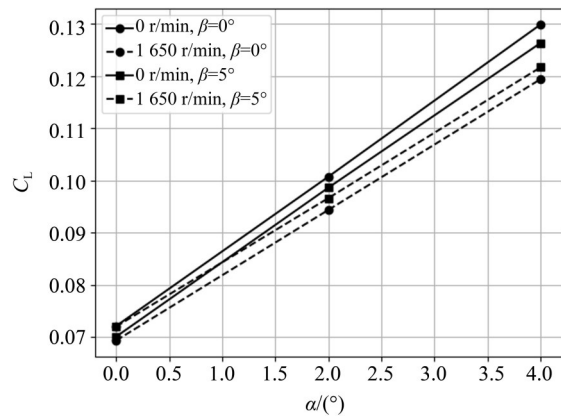


图16 不同螺旋桨运行工况下的无人机机翼升力
Fig. 16 UAV wing lift under different propeller operating conditions

在动力系统的影响下, 无人机机翼所在位置速度明显增加, 如图22所示。由于螺旋桨旋转效应, 在螺旋桨左右两侧无人机机翼上迎角发生了不同变化, 参见图23无人机机翼前缘驻点位置的变化; 另外, 螺旋桨滑流导致无人机机翼阻力增加; 且螺旋桨滑流导致无人机机翼俯仰力矩变小, 相当于产生了一个低头力矩, 增加了飞机俯仰稳定性。螺旋

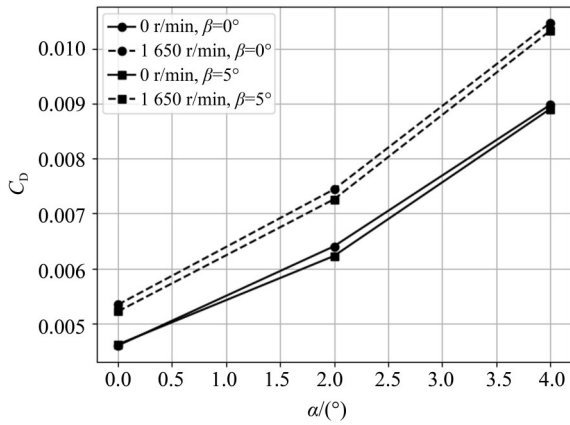


图 17 不同螺旋桨运行工况下的无人机机翼阻力
Fig. 17 UAV wing drag under different propeller operating conditions

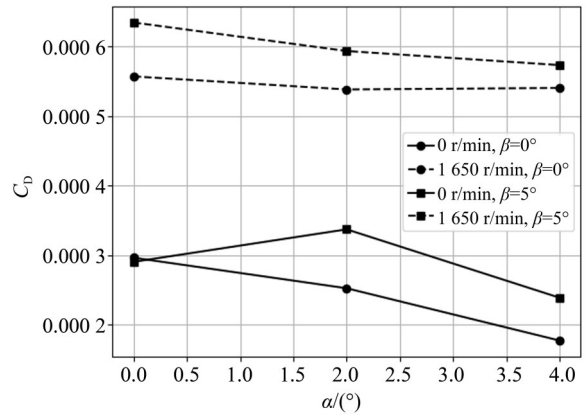


图 20 不同螺旋桨运行工况下的短舱阻力
Fig. 20 Drag of the nacelle under different propeller operating condition

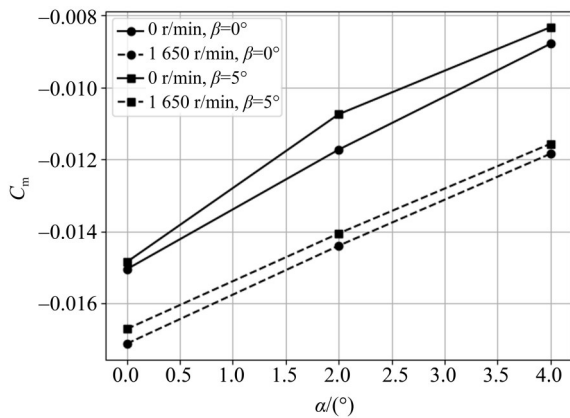


图 18 不同螺旋桨运行工况下的无人机机翼俯仰力矩
Fig. 18 UAV wing lift pitch moment under different propeller operating condition

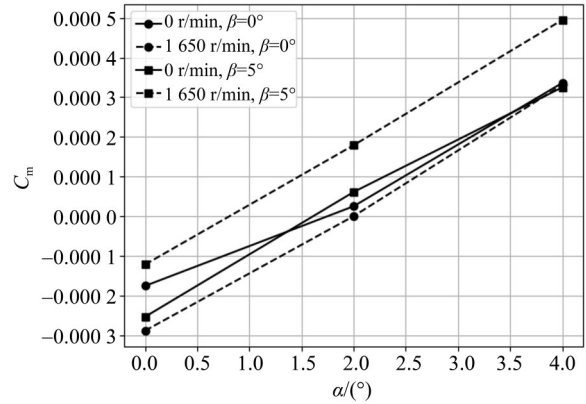


图 21 不同螺旋桨运行工况下的短舱俯仰力矩
Fig. 21 Pitch moment of the nacelle under different propeller operating condition

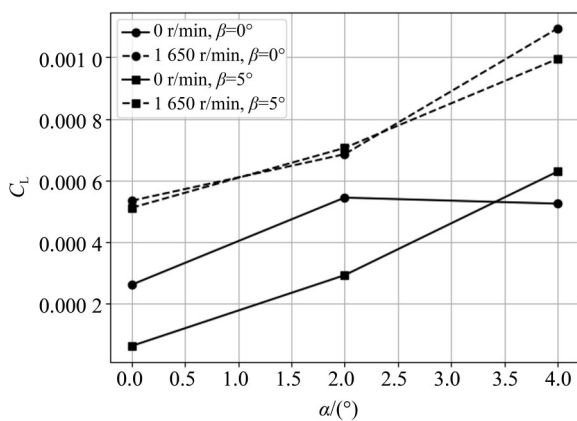


图 19 不同螺旋桨运行工况下的短舱升力
Fig. 19 Lift of the nacelle under different propeller operating condition

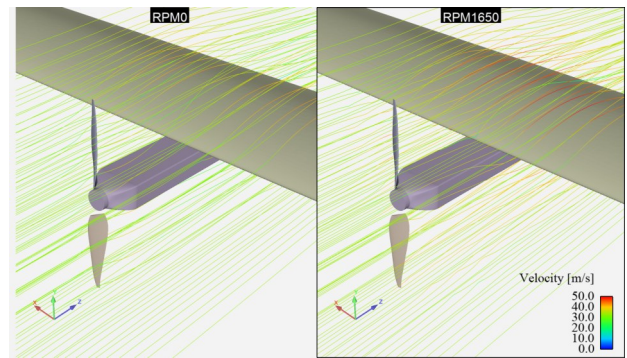


图 22 有无动力状态下螺旋桨附近的流线
Fig. 22 Streamlines near propeller under powered and unpowered propeller

桨滑流导致无人机短舱阻力增加。由于无人机短舱平面相比于桨盘面积较小，受力和影响都较小，所以不做过多讨论。

5 结论

1) 带机翼螺旋桨的推力、功率和效率均增加，主要归因于无人机机翼阻塞作用导致螺旋桨当地来流速度减小。由于计算时螺旋桨效率的来流速度为无穷远流速，该速度要大于受到无人机

机翼影响后螺旋桨所在位置的当地速度,因此造成螺旋桨名义效率上升。

2) 随着螺旋桨安装位置距无人机机翼的距离的增加,带机翼螺旋桨和单独螺旋桨的性能差异逐渐减弱。

3) 螺旋桨滑流导致无人机机翼升力曲线斜率降低,阻力增加,俯仰稳定性增加。这主要是因为螺旋桨的滑流方向与无人机机翼的角度固定,在迎角增加的时候,螺旋桨滑流导致无人机机翼的当地迎角未达到自由来流迎角,所以升力反而降低。

4) 由于无人机短舱平面相比桨盘面积较小,螺旋桨滑流对短舱影响很小,主要是螺旋桨滑流

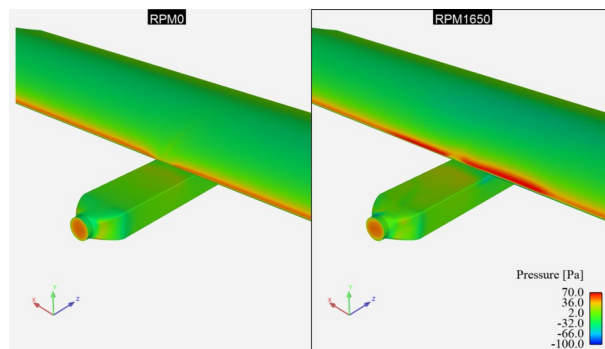


图23 螺旋桨滑流导致的无人机机翼压力变化

Fig. 23 The UAV wing pressure change caused by propeller slipstream

加速导致短舱阻力的少许增加。

参考文献:

- 程晓亮,李杰,2011.螺旋桨滑流对机翼气动特性影响的方法研究[J].科学技术与工程,11(14):3229-3235.
- 邓磊,段卓毅,钱瑞战,等,2019.螺旋桨滑流对短舱/机翼构型尾迹流场的影响[J].航空学报,40(5):6-16.
- 高飞飞,2017.螺旋桨滑流非定常数值模拟与影响研究[J].航空计算技术,47(5):14-17+21.
- 李博,梁德旺,黄国平,2008.基于等效盘模型的滑流对涡桨飞机气动性能的影响[J].航空学报,4:845-852.
- 刘沛清,2006.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:152.
- 聂波,王海峰,杜晨曦,等,2025.侧流对平流层飞艇螺旋桨气动载荷的影响[J/OL].航空动力学报,40(2):20230207.
- 马率,邱名,王建涛,等,2019.CFD在螺旋桨飞机滑流影响研究中的应用[J].航空学报,40(4):111-125.
- 饶崇,张铁军,魏闯,等,2021.一种分布式电动飞机螺旋桨滑流影响机理[J].航空学报,42(S1):157-167.
- 孙宗燕,王强,乔伟,等,2024.电动飞机分布式螺旋桨-机翼设计分析方法研究[J].航空科学技术,35(1):53-64.
- 王科雷,周洲,祝小平,2017.耦合多螺旋桨滑流影响的低雷诺数机翼设计[J].航空学报,38(6):115-127.
- 王红波,祝小平,周洲,等,2015.太阳能无人机螺旋桨滑流气动特性分析[J].西北工业大学学报,33(6):913-920.
- 吴浩,石永康,赵越,等,2024.螺旋桨滑流对机翼特性的影响研究[J].机床与液压,52(14):1-6.

- 徐家宽,白俊强,黄江涛,等,2014.考虑螺旋桨滑流影响的机翼气动优化设计[J].航空学报,35(11):2910-2920.
- 杨小川,王运涛,王光学,等,2014.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,32(3):289-294.
- 张刘,白俊强,李华星,等,2012.螺旋桨滑流与机翼之间气动干扰影响研究[J].航空计算技术,42(2):87-91.
- BOUSQUET J M, GARDAREIN P, 2003. Improvements on computations of high speed propeller unsteady aerodynamics[J]. Aerosp Sci Technol, 7(6): 465-472.
- KHIER W, 2006. Time-accurate versus actuator disk simulations of complete helicopters [M]. Berlin, Heidelberg: Springer.
- ROOSENBOOM E W M, STÜRMER A, SCHRÖDER A, 2010. Advanced experimental and numerical validation and analysis of propeller slipstream flows[J]. J Aircr, 47(1): 284-291.
- STUERMER A, RAKOWITZ M, 2005. Unsteady simulation of a transport aircraft propeller using MEGAFLOW [EB/OL]. <https://www.academia.edu/27863588>.
- THOMAS J L, WALTERS R W, REU T, et al, 1990. Application of a patched-grid algorithm to the F/A-18 forebody-leading-edge extension configuration [J]. J Aircr, 27(9): 749-756.

(责任编辑 王海蓉)