

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.026

小型共轴对转螺旋桨气动设计与仿真研究

姜东晨, 李博

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 小型共轴螺旋桨结构无人机具有纵向尺寸小、利于在狭小空间操控、起飞降落不受场地约束等优点。基于最佳环量分布螺旋桨设计方法, 对一款小型共轴对转螺旋桨建模并进行仿真模拟, 改变转速及螺旋桨间距, 探究其气动规律。结果表明: 双桨状态上下桨效率大多情况均高于单桨, 整体效率在 6 000 r/min 时达到最大值为 0.74; 改变桨间距后, 在间距为 $0.5R$ 、转速为 6 000 r/min 时的最大效率为 0.76。

关键词: 小型无人机; 共轴对转螺旋桨; 螺旋桨间距; 气动干扰; CFD 模拟

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0137-04

Aerodynamic Design and Simulation Study of Small Co-axial Counter-rotating Propeller

JIANG Dongchen, LI Bo

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Small coaxial propeller structure UAV, small in longitudinal size, is convenient for maneuvering in a small space, and its take-off and landing are not restricted by the site. Based on the optimal circulation distribution propeller design method, a small coaxial counter-rotating propeller is modelled and simulated, its rotation speed and propeller pitch are changed and its aerodynamic laws are explored. The results show that the efficiency of the upper and lower propellers in the double propeller state is higher than that of the single propeller in most cases, with overall efficiency reaching a maximum value of 0.74 at 6 000 r/min, and the maximum efficiency being 0.76 at a pitch of $0.5R$ and a rotation speed of 6 000 r/min upon propeller pitch change.

Keywords: small UAV; coaxial counter-rotating propeller; propeller spacing; aerodynamic interference; CFD simulation

0 引言

在过去十年间, 小型/微型无人机是航空工程领域研究最多的项目之一, 无论在军用或者民用方面都有着非常大的潜力, 如识别、灾害控制、侦察、精准农业以及紧急援助等。这些都是小型/微型无人机能够适应的任务环境^[1-4]。

共轴螺旋桨结构形式的无人机^[5-8]具有纵向尺寸小, 利于在狭小空间操控的优点。微小型螺旋桨无人机一般处于低雷诺数环境(小于 10^5), 同时与相关大尺寸螺旋桨^[9-12]相比, 小型螺旋桨的黏性力对其气动性能产生较大影响, 整体效率也低于中大型螺旋桨。因此合理的气动布局及气动性能对于小型螺旋桨更加重要。

国外, 法国南希自动化控制研究中心及法国圣路易研究院联合对适用于 80 mm 单兵迫击炮发射的 GLMAV 微小型无人机进行了研究^[13-15]。国内, 危怡然等^[16]对微型筒式共轴双旋翼无人机共

形桨叶进行了设计与气动仿真, 基于微型筒式共轴双旋翼无人机, 设计了一种圆弧形桨叶, 将设计的共形桨叶翼型与传统 NACA0012 翼型进行了比较, 然后根据无人机特点求解最优化翼展, 最后对整个旋翼进行弦长优化。

本文以高度 100 m、来流 60 m/s 为设计状态, 对一款小型共轴对转螺旋桨进行设计建模与气动仿真, 探究不同转速下、不同桨间距下气动规律。

1 螺旋桨建模与网格划分

1.1 设计方法

传统螺旋桨设计理论包括动量理论、叶素理论、片条理论等, 本文将选择基于最佳环量分布^[17-19]的螺旋桨设计方法。该方法的原理为: 在选定翼型及设计状态参数的情况下, 基于最小能量损失确定诱导螺距 V' 及最佳环量分布; 在已算出的最佳环量分布基础上, 结合片条理论逆向推

第一作者简介: 姜东晨 (1998—), 男, 辽宁丹东人, 硕士研究生, 研究方向为进气道与螺旋桨气动设计与仿真, 1792720444@qq.com。

导,求解出叶素的弦长及安装角。螺旋桨设计流程如图 1 所示。

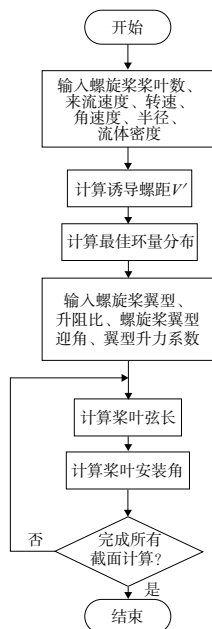


图 1 螺旋桨设计流程图

1.2 设计参数及建模

本文设计一款低空、低雷诺数环境下应用于小型无人机的 10 cm 量级共轴对转螺旋桨,同时可以应用于炮射型无人机平台。设计高度为 100 m,以张开螺旋桨状态时为设计状态,假定来流速度为 60 m/s,螺旋桨桨叶数 $N=2$,螺旋桨直径 $D=0.3$ m,上下两螺旋桨间距 $H=0.4R$, R 为螺旋桨半径。在 Catia 中创建模型实体,如图 2 所示。

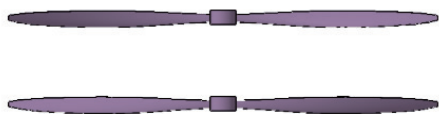


图 2 对转螺旋桨模型

1.3 网格划分

采用 Fluent meshing 进行非结构网格划分。为了更加精准地描述螺旋桨壁面附近流场情况,第 1 层网格厚度为 0.004 85 mm,层数设置为 15 层,单个旋转域网格数 124 万个,外流域网格数 23 万个,如图 3 所示。将旋转域和外流域进行拼接,边界条件设置为:湍流模型选择 $k-\omega$ SST,旋转域定义为参考系运动,桨叶定义为旋转移动壁面,来流速度 60 m/s,100 m 高度空气密度 1.21 kg/m^3 ,

压力 100 129 Pa,温度 287.5 K。

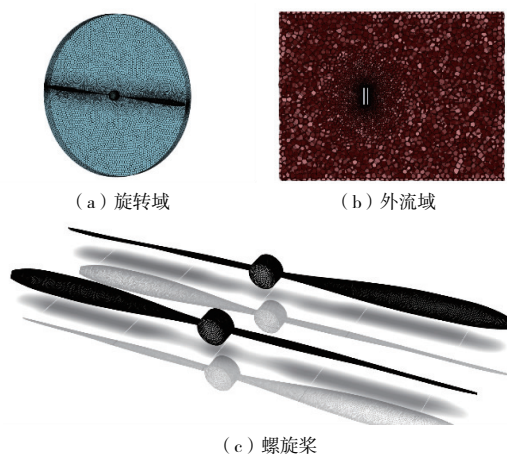


图 3 旋转域、外流域及螺旋桨网格

2 单桨仿真

采用 Fluent 对单桨状态下进行仿真模拟,来流速度为 60 m/s;共计 6 种转速,分别为 5 000 r/min、5 500 r/min、6 000 r/min、6 500 r/min、7 000 r/min、7 500 r/min;监测螺旋桨转矩 Q 、拉力 T 、功率 P 、效率 η 等参数,如图 4—图 5 所示。

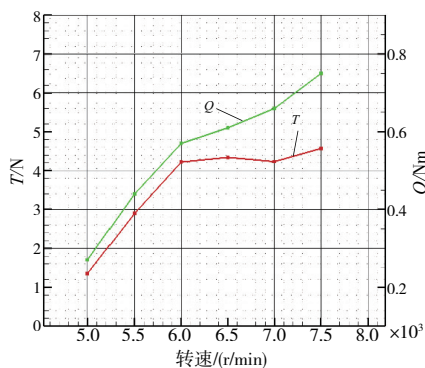


图 4 拉力与转矩曲线

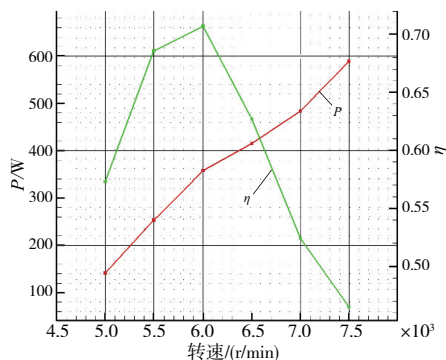


图 5 功率与效率曲线

结果表明:拉力随转速升高整体呈增高趋势,

但是在 $6\,000\text{ r/min} \sim 7\,000\text{ r/min}$ 基本持平;转矩随转速逐渐增高;螺旋桨效率随转速先增大后降低,在 $6\,000\text{ r/min}$ 时达到最大值 0.71 ;而功率随转速逐渐升高,且 $6\,000\text{ r/min}$ 后功率的增加反而带来总体效率下降,在此之后气动性能较差。对于小型共轴对转螺旋桨,由于两桨之间距离较近,因此两者之间相互气动干扰也会随条件变化而变化,单桨计算的结果为之后双桨的计算提供对比与参考。

3 对转螺旋桨仿真

在对转状态计算螺旋桨拉力、转矩、功率、效率等参数,如图 6—图 8 所示。边界条件和单桨状态下相同,以下参数下角标为 1 代表上螺旋桨,2 代表下螺旋桨,未标注则代表整体参数。

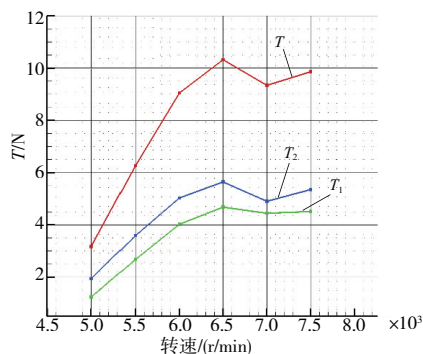


图 6 推力曲线

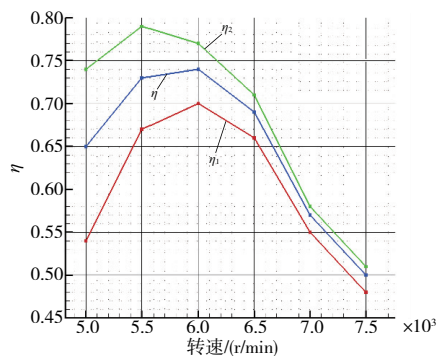


图 7 效率曲线

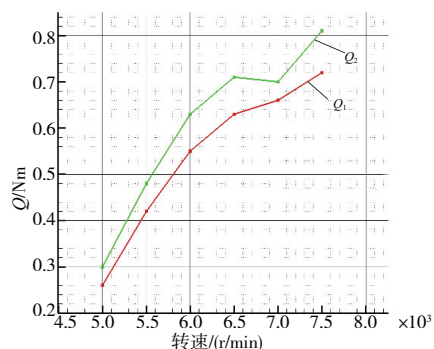


图 8 转矩曲线

从结果得知:下螺旋桨推力始终高于上螺旋桨,在 $6\,500\text{ r/min}$ 前随转速逐渐增高,之后则出现波动,受双桨的相互影响,气动干扰加剧,反而推力下降;下螺旋桨效率始终高于上螺旋桨,整体都呈现随转速先增加后降低的趋势,在 $6\,000\text{ r/min}$ 达到最大值 0.74 ,在低转速时下螺旋桨效率受上螺旋桨尾流影响远大于上螺旋桨效率,到高速区间,气流产生负面干扰,使二者差距稳定;虽然上下螺旋桨转速相同,由于之间的相互干扰导致下螺旋桨的转矩始终高于上螺旋桨。单桨状态与双桨状态参数对比如图 9—图 10 所示。

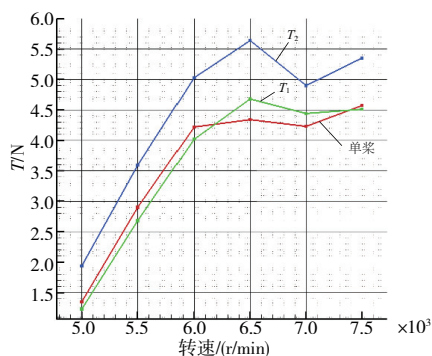


图 9 推力对比

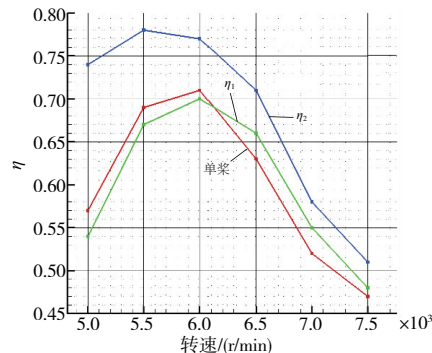


图 10 效率对比

双桨情况下的上桨推力与单桨状态推力保持一致,下桨推力始终高于单桨状态推力。双桨状态时在 $6\,000\text{ r/min}$ 前单桨效率高于上桨,但其他状态均高于单桨效率,说明双桨状态流场优化使整体效率相比单桨更高。设计转速下双桨流场如图 11—图 12 所示(本刊为黑白印刷,疑问之处请向作者咨询)。

4 不同桨间距气动仿真

双桨状态下由于两桨之间存在相互气动干扰,在不同工况下对流场会产生重要影响,而两桨之间的间距是其中关键因素之一。取间距 H 为

0.3R、0.4R、0.5R、0.6R 这 4 种情况进行仿真模拟,结果如图 13—图 16 所示。

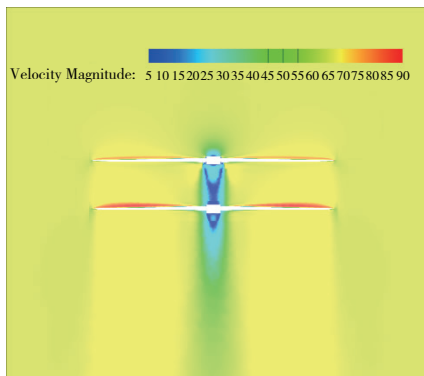


图 11 速度云图

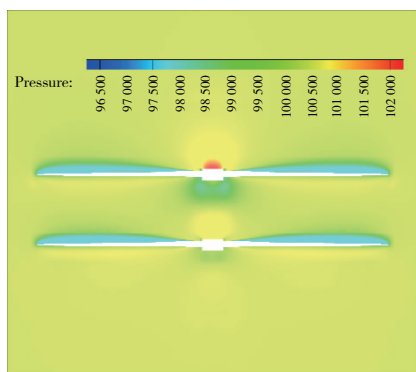


图 12 压力云图

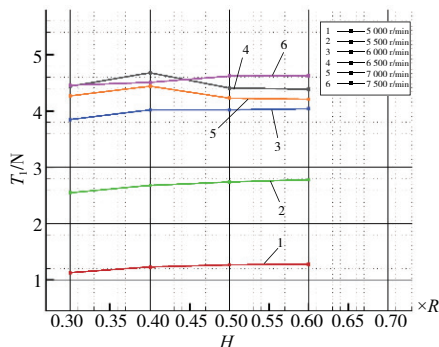


图 13 T_1 随间距变化曲线

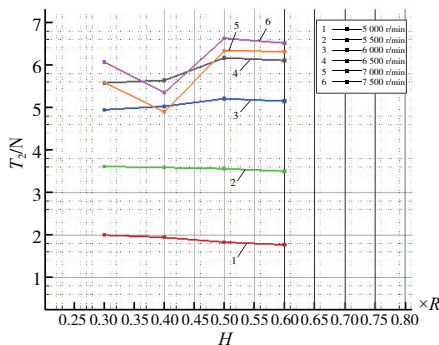


图 14 T_2 随间距变化曲线

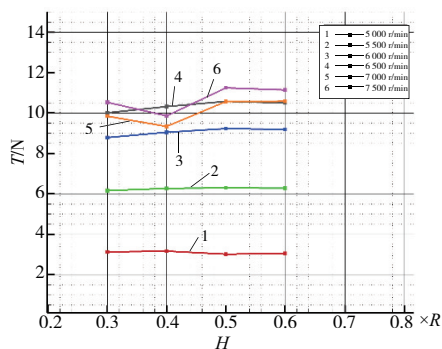


图 15 总升力随间距变化曲线

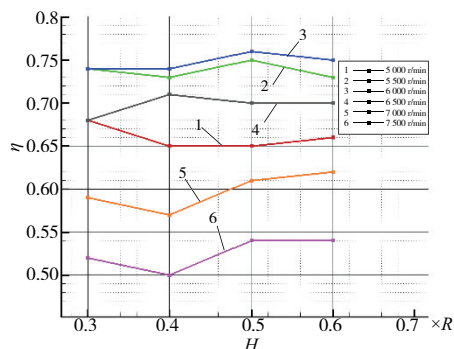


图 16 总效率随间距变化曲线

从计算结果得知:在低转速时,上螺旋桨推力随桨间距增大整体呈增大趋势,但是不明显,高速呈整体降低趋势;下螺旋桨推力在不同转速区间特性不同,低转速时随桨间距增大缓慢降低,中等转速则缓慢升高,高转速时则呈波动;除了最低转速情况,对桨总推力峰值均出现在桨间距为 0.5R 时;转速相同时,总效率最低基本均出现在桨间距为 0.4R 时,最大效率出现在间距为 0.5R、转速为 6 000 r/min 时的 0.76,说明对于此共轴对转螺旋桨而言,0.5R 的桨间距会有更加良好的气动性能。

5 结语

本文对一款小型共轴对转螺旋桨进行建模仿真分析,将对转螺旋桨与单桨状态以及对转螺旋桨在不同桨间距、不同转速情况下对其推力、转矩、效率等进行计算,探究其气动规律,得到以下主要结论:

1) 单桨在低转速区间推力随转速增加明显,进入高转速区间增幅较小,效率随转速先增大后降低,在 6 000 r/min 时达到峰值 0.71;

2) 下螺旋桨效率始终高于上螺旋桨,上下螺旋桨体都呈现随转速先增加后降低的趋势,总效率在 6 000 r/min 时达到最大值 0.74;

(下转第 196 页)

- [9] 李迎丽,杨雨琦,刘霞,等. 基于改进 MLP 和单传感器的复合故障辨识算法[J]. 设备管理与维修, 2023(11):41-44.
- [10] 谢国民,刘东阳,刘明. 多策略改进 MPA 算法与 HKELM 的变压器故障辨识[J]. 电子测量与仪器学报, 2023,37(4):172-182.
- [11] 邓子虎,陈洁,王新雷,等. 基于卷积神经网络的关键输电断面故障诊断[J]. 现代电子技术, 2023, 46(9):140-147.
- [12] 秦波,罗权毅,冯卫卫,等. 基于相关能量波动评估的学习样本筛选与深度置信神经网络的滚动轴承故障诊断研究[J]. 机械强度, 2023,45(2):262-270.
- [13] 周泽雷,吴正平,付翊航,等. 多端直流电网的非边界依赖型线路故障辨识方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023,35(4):100-108,123.
- [14] 董晓鑫,赵荣珍. 基于 SILPDA 的旋转机械故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2023,42(2):16-22.
- [15] 唐圣学,马晨阳,勾泽. 基于时频特征融合与 GWO-ELM 的棒控电源早期故障状态辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2023,44(1):121-130.
- [16] 周俊,何钊睿,樊轶,等. 基于小波-树突状网络的配电网单相接地故障辨识方法[J]. 电力信息与通信技术, 2022,20(12):55-62.
- [17] 杜立杰,郝洪达,李青蔚,等. 基于 LSTM 神经网络的小转弯隧道 TBM 掘进轴线偏差预测方法[J]. 煤炭学报, 2024,49(增刊2):1184-1194.
- [18] 谢国民,王嘉良. 基于混合采样与 IHBA-SVM 的变压器故障辨识方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022,36(12):77-85.
- [19] 庞聪,马武刚,李查玮,等. 基于 CEEMDAN 多尺度模糊熵和 SSA-BP 神经网络的 VP 型垂直摆倾斜仪故障辨识[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(35):15612-15616.
- [20] 陈业泓,周航,陆鑫,等. 基于 SSD-YOLO 的动车组制动盘螺栓故障检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2025,62(8):113-122.

收稿日期:2023-10-26

(上接第 140 页)

3)除了最低转速情况,对桨总推力峰值均出现在桨间距为 $0.5R$ 时,最大效率出现在间距为 $0.5R$ 、转速为 $6\,000\text{ r/min}$ 时的 0.76 ,说明对于此共轴对转螺旋桨而言, $0.5R$ 的桨间距会有更加良好的气动性能。

参考文献:

- [1] 刘志强,王金星. 小型无人机航测技术在土地测绘中的应用[J]. 大众标准化, 2022(17):38-40.
- [2] 赵海涛. 基于小型无人机光学平台的目标识别技术研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2024.
- [3] 李艺舟,李江坤,刘忠,等. 基于小型无人机的航磁测量系统研发及试验应用[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(2):312-320.
- [4] 陈瑶瑶,刘泉,洪晓苇,等. 面向 TOD 的小型无人机配送服务空间模式——以深圳美团试点为例[J]. 城市发展研究, 2025,32(4):22-30.
- [5] 杨伟超. 共轴双旋翼无人机农林喷洒作业规划研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院, 2024.
- [6] 吉思臣. 变质心涵道共轴双旋翼无人机关键技术研究[D]. 西安:西安工业大学, 2023.
- [7] 王涛. 小型共轴双旋翼无人机的设计及研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- [8] 纪玉霞. 微型共轴双旋翼气动布局优化设计与试验研究[D]. 福州:福州大学, 2018.
- [9] 郝春晖. 高速螺旋桨的翼型气动特性研究[D]. 北京:北方工业大学, 2023.
- [10] 邓佳子. 共轴对转螺旋桨级间非定常气动干扰及性能研究[D]. 北京:北方工业大学, 2023.
- [11] 赵荣泽,王博,曹德松,等. 基于贝叶斯优化方法的高速共轴对转螺旋桨桨叶气动外形优化设计[J]. 空气动力学学报, 2025,43(3):67-77.
- [12] 原昕,招启军,赵国庆. 轴流状态对转螺旋桨气动性能高效预测方法[J]. 航空动力学报, 2024,39(4):36-46.
- [13] 李佳,房玉军. 共轴反向双旋翼弹药——GLMAV 巡飞弹[J]. 飞航导弹, 2015(1):13-15.
- [14] ROUSSEL E, GNEMMI P, CHANGEY S. Gun-launched micro air vehicle: Concept, challenges and results[C]// 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2013: 143-151.
- [15] KOEHL A, RAFARALAHY H, BOUTAYEB M, et al. Aerodynamic modelling and experimental identification of a coaxial-rotor UAV[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012,68(1):53-68.
- [16] 危怡然,邓宏彬,江明,等. 微型筒式共轴双旋翼无人机共形桨叶设计与气动仿真[J]. 无人系统技术, 2019,2(5):39-45.
- [17] 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.
- [18] 邱辉壮,江善元,钟伯文. 中低空太阳能无人机高效螺旋桨设计方法[J]. 航空工程进展, 2022,13(4):83-90,123.
- [19] 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.

收稿日期:2023-11-01