

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.047

混合动力通勤飞机推进系统气动布局研究

伍庭佳¹, 王宇¹, 李湘¹, 张帅²

(1. 南京航空航天大学 航空学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国商用飞机有限责任公司 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘 要:使用 VSPAERO 气动分析模块, 以 X-57 机翼作为算例, 对螺旋桨滑流气动特性进行计算, 将气动分析结果与文献中的 CFD 分析数据进行对比, 验证软件的精度和可靠性。将其应用于 19 座通勤类飞机, 分别对 1—3 对电机+桨 3 种气动布局方案参数化建模, 调整螺旋桨的位置、尺寸及性能参数, 快速分析飞机以巡航马赫数飞行在不同迎角下的升阻特性。结果表明:3 种方案中六桨方案最优, 此方案能显著降低全机诱导阻力, 使总升阻比较双桨可提高 14.8%, 相对于四桨可提高 31.9%。

关键词:通勤飞机; 油电混动; 分布式推进; VSPAERO; 多桨配装

中图分类号: V228.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)03-0219-04

Research on Aerodynamic Layout of Propulsion System for Hybrid Electric Commuter Airplane

WU Tingjia¹, WANG Yu¹, LI Xiang¹, ZHANG Shuai²

(1. College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Beijing Civil Aircraft Technology Research Institute, COMAC, Beijing 102211, China)

Abstract: The VSPAERO aerodynamic analysis module is used to calculate the aerodynamic characteristics of propeller slipstream taking X-57 wing as an example. The aerodynamic analysis results are compared with the CFD analysis data in the literature to verify the accuracy and reliability of the software. With the application of the software to 19 commuter aircrafts, and the parametric modeling of three aerodynamic layouts of 1 to 3 pairs of motors + propellers is carried out respectively. The position parameters, size parameters and performance parameters of propellers are adjusted, and the lift and drag characteristics of aircrafts flying at different angles of attack at cruise Mach number are analyzed. The results show that the six-propeller aerodynamic layout is the best of the three schemes, which can significantly reduce the induced resistance of the whole aircraft, with 14.8% increase of the total lift drag compared with two propellers and 31.9% increase compared with four propellers.

Keywords: commuter aircraft; gasoline-electric hybrid; distributed propulsion; VSPAERO; multi-propeller assembly

0 引言

在混动通勤飞机概念设计阶段, 需要通过分析螺旋桨滑流与机体的相互作用来确定全机升阻特性, 进而指导推进系统的气动布局设计。对螺旋桨滑流影响的全机气动分析仍较多采用基于 N-S 方程的 CFD 数值模型。斯坦福大学 CLARKE 等^[1]利用 SUAVE 保真气动模块, 研究了 3 种不同推进气动布局的螺旋桨飞机, 包括两种分布式电推进结构和双螺旋桨布局, 用于分析螺旋桨、转子、升力面及其相互作用。WALES 等^[2]分别采用激励盘和 URANS 模型对双发通勤飞机螺旋桨计算, 并与 Clean-Sky2 项目中的风洞实验数据对

比, 具有很好的拟合效果。李博等^[3]应用激励盘模型对某四发涡桨飞机的全机三维流场进行了数值模拟, 分析了螺旋桨滑流对全机流场特征的影响, 给出了滑流对全机升阻力系数的影响量。杨溢^[4]依据激励盘理论简化实际螺旋桨构型, 改变激励盘的径向载荷分布形式, 模拟了螺旋桨滑流对飞机气动特性的影响。栗枢等^[5]对比分析了不同转速-速度匹配下螺旋桨表面积冰对气动的影响。

目前, 对混合动力飞机气动布局设计主要对象是 2—4 座的轻小型飞机, 尚未开展对支线 and 干线混合飞机推进系统气动布局选型的研究。基于此背景, 对 19 座混合动力通勤飞机, 多种不同

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (NP2022428)

第一作者简介: 伍庭佳 (2000—), 男, 四川巴中人, 硕士研究生, 研究方向为飞行器总体设计, 820895834@qq.com。

数量、不同安装位置的螺旋桨气动布局进行分析,从中选取较优的气动布局设计。目前更适用于概念设计阶段的气动布局设计方法是将涡格法和激励盘方法相结合,能快速和较准确地分析螺旋桨飞机气动特性。本文使用的 VSPAERO 是由美国宇航局开发的概念飞机设计工具 OpenVSP^[6-7]中用于气动分析的模块,基于其快速建模和气动分析能力,首先通过算例验证了 VSPAERO 气动模块的计算精度,然后对 19 座油电混动通勤飞机进行了多桨配置气动布局研究。

1 混合动力通勤飞机 OpenVSP 建模

OpenVSP 集成了飞机常见的部件,如机身、机翼、动力装置、短舱等部件。在 EXCEL 表里定义飞机各部件的参数信息。通过 VBA 语言将参数信息写入到 VSPScript 脚本中,调用 OpenVSP 软件完成气动建模和分析计算。混合动力通勤飞机的主要外形参数参考我国 19 座级固定翼通勤类飞机的运 12E 飞机。将安装在机翼吊舱的 PT6A-27 的两对涡桨发动机,减掉一台发动机并将另一台发动机与机身做成一体化,减少的发动机功率由电机驱动螺旋桨提供,减少的燃油替换为电池,驱动螺旋桨的能量由飞机燃油和电池共同提供。如图 1 所示,应用涡格法+激励盘理论方法分别对 1—3 对电机+桨叶气动布局方案进行快速估算。根据各方案的升阻特性,选择合适的能源改型气动方案。

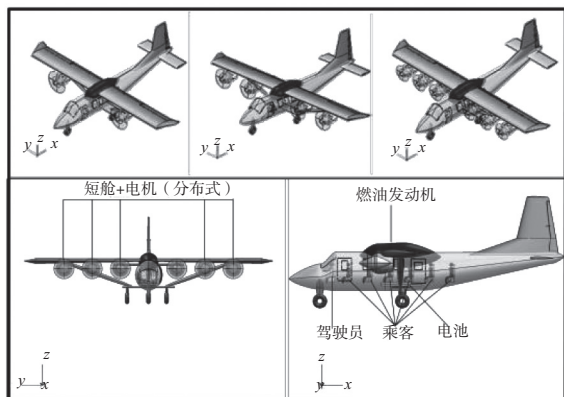


图 1 OpenVSP 3 种气动布局方案建模

根据推进系统产生的功率 P 和桨盘产生的拉力 T 及螺旋桨直径 D 、螺旋桨转速 N 可以计算出螺旋桨的拉力系数 C_T 和功率系数 C_P ,如下所示。

$$C_P = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{\rho N^2 D^4} \quad (2)$$

将双发涡桨动力方案改为由单发油电混动,通过发动机需求功率和推力,得出匹配螺旋桨直径和转速等参数信息,如表 1 所示。

表 1 单发混动螺旋桨参数匹配

布局方案	D/m	C_P	C_T	$N/(r/min)$
1 对电机+桨	2.028	0.130 6	0.142 3	2 150
2 对电机+桨	1.685	0.130 6	0.129 3	2 350
3 对电机+桨	1.385	0.130 6	0.128 9	2 850

2 VSPAERO 算例验证

验证的算例构型为螺旋桨+机翼的气动构型,螺旋桨是 X-57^[8] 的高升力螺旋桨,机翼为矩形翼,翼型采用 X-57 机翼的翼根翼型,如图 2 所示,其参数如表 2 所示。

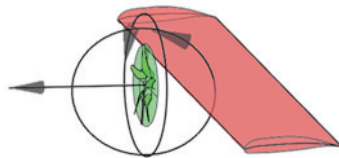


图 2 算例构型:螺旋桨+机翼

表 2 机翼和螺旋桨参数

参数	数值
机翼弦长/m	0.714 1
机翼展长/m	3.048
机翼面积/m ²	2.176 7
机翼 1/4 弦线位置 $x, y, z/m$	0.178 6, 0, 0
螺旋桨桨叶数量	5
螺旋桨直径/m	0.576
螺旋桨叶根直径/m	0.116 8
螺旋桨位置 $x, y, z/m$	-0.259, 0, -0.108

VSPAERO 模块计算输出 Polar 文件中没有考虑到激励盘推力分量,应根据式(3)—式(7)将推力进行分解,添加到机翼的力和力矩中,以获得总的力和力矩。

$$L_{total} = L_{wing} + T \sin \alpha \quad (3)$$

$$D_{total} = D_{wing} - T \cos \alpha \quad (4)$$

$$M_{xtotal} = M_{xwing} + M_{xprop} \quad (5)$$

$$M_{y\text{total}} = M_{y\text{wing}} + T(z_{\text{wing}} - z_{\text{prop}}) \quad (6)$$

$$M_{z\text{total}} = M_{z\text{wing}} + T(y_{\text{prop}} - y_{\text{wing}}) \quad (7)$$

式中: T 为螺旋桨产生的拉力; α 为机翼攻角; L_{total} 、 D_{total} 分别为计入螺旋桨拉力的总升力和总诱导阻力; $M_{x\text{total}}$ 、 $M_{y\text{total}}$ 、 $M_{z\text{total}}$ 分别为对应坐标轴产生的合力矩。

图3为算例构型考虑螺旋桨推力分解下的总升力、总诱导阻力对坐标轴总力矩大小与CFD高

精度数值软件计算结果对比图。计算出的升力和诱导阻力与CFD的数据^[9]具有较好的吻合性且趋势一致,但从力矩结果上看,虽然两者的数值大小在同一数量级,但是由于激励盘理论基于无黏和无旋假设,计算结果出现一定的误差,但是计算速度却显著提高,对于估算升降特性具有很好的参考意义。

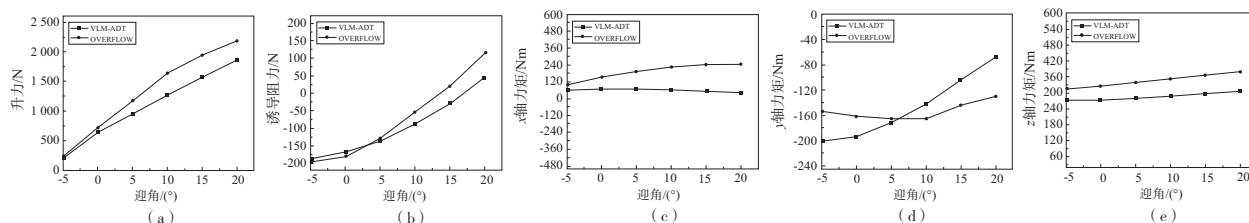


图3 总力和力矩

3 混动通勤类飞机气动布局研究

3.1 气动改型方案滑流计算

分别对双桨、四桨、六桨3种气动布局进行分析,通过修改桨盘直径、旋转速度、功率系数、拉力系数、螺旋桨和吊舱展向占位参数、螺旋桨转向(同翼根到翼梢旋转方向)完成气动外型建模并与对应的3种无滑流(无激励盘)情况进行对比,计算结果如图4所示。从升力系数来看,双螺旋桨和六螺旋桨较无激励盘模型有一定增加,且六螺旋桨升力系数较双螺旋桨随着迎角而逐渐增大,但是对于四螺旋桨布局,在 $0^\circ \sim 4^\circ$ 迎角下,升力系数相比无激励盘有一定提升,但在 4° 攻角之后,升力系数反而小于无激励盘模型。

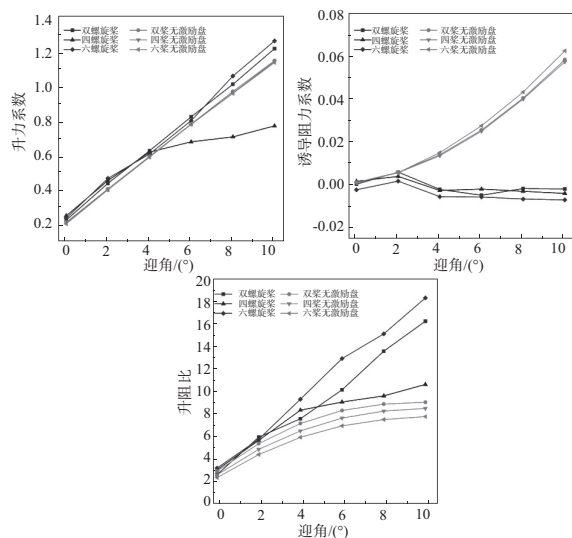


图4 有、无激励盘升降特性对比

从计算结果来看,由于螺旋桨滑流影响,相比无激励盘模型对诱导阻力有明显抑制作用,且诱导阻力随螺旋桨数量增加,出现数值不断降低的趋势。对于全机升阻比,3种气动布局均较无激励盘有显著提高,在小攻角(2° 迎角)下,3种布局方案升阻比相差不大。随着迎角增加,在 4° 迎角之后,四桨气动布局的升阻比明显小于其他两种布局方案,而对于双桨和六桨气动布局,六桨方案升阻比要高于双桨方案。

图5为3种气动布局沿展向 C_L 分布图和 $\alpha = 0^\circ$ 时上下表面压强系数差分布云图和尾迹流线图。图中反映了在机翼螺旋桨两侧升力系数会突变增大,同时由于滑流效应改变气流尾迹并随着螺旋桨数量增加,滑流效应逐渐对飞机尾翼部件产生影响,改变气动升降特性,造成诱导阻力减小,升阻比进一步增加,而升力系数受到桨叶数量和转向的影响。本文研究的3种气动布局中螺旋桨转向均是以飞行员视角向机翼外侧旋转,可以看出在此转向下六桨气动布局升阻比优于其他两种方案,其升阻比较双桨可提高14.8%,相对于四桨可提高31.9%。由于四桨方案明显劣于其他两种方案,故不进一步研究。在下文中将对六桨布局方案,探讨其转向组合对气动产生的影响。

3.2 六桨转向组合气动分析

不同螺旋桨转向的组合方式,会影响多组螺旋桨总的升力效应。以六螺旋桨为例,分析其以 2° 迎角巡航时的升降特性。以 $\rightarrow$ 表示飞行员视角右侧机翼螺旋桨顺时针旋转方向,以 $\leftarrow$ 表示螺旋

桨逆时针旋转方向,如表3所示,分析转向构型1—构型8升力系数沿机翼展向分布情况。

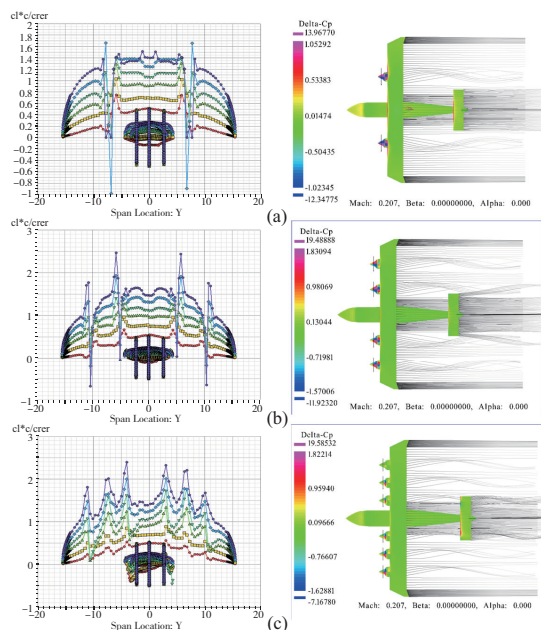


图5 全机展向 C_L 分布和压差分布

表3 六螺旋桨构型转向组合

六螺旋桨 转向构型	构型方向 (右半模型)	升力系数 C_L	诱导阻力 系数 C_{Di}
构型1	→ → →	0.457 67	0.005 56
构型2	→ ← →	0.453 03	0.008 19
构型3	← → →	0.429 58	0.007 28
构型4	← ← →	0.419 96	0.007 78
构型5	→ → ←	0.429 54	0.006 92
构型6	← → ←	0.399 76	0.006 55
构型7	→ ← ←	0.420 22	0.007 50
构型8	← ← ←	0.386 55	0.005 84

图6为8种不同螺旋桨转向组合升力系数沿翼展方向分布图。从图示曲线分布规律可以看出,升力系数在螺旋桨布置位置处发生突变,不同的转向组合会影响总的升力特性,如构型1和构型2组合,会对提高升力系数起到增益效果,而其他转向组合如构型6和构型8反而会降低升力系数。

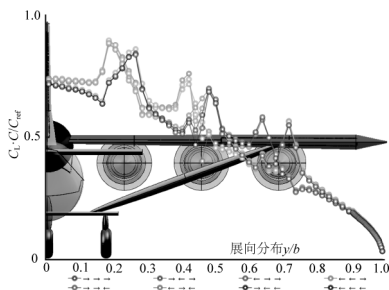


图6 六桨构型转向组合机翼展向升力系数分布

4 结语

本文对19座级固定翼通勤类飞机3种推进系统气动布局进行研究,得出以下结论:

1)使用VSPAERO对X-57机翼升力、阻力和力矩与文献中CFD数据进行验证对比,两者数据具有很好的吻合性;

2)通过分析19座通勤类飞机3种布局方案及无螺旋桨构型,滑流效应能显著降低诱导阻力,提高全机升阻比;

3)从升阻特性看,六桨分布式方案优于其他两种布局方案,其升阻比较双桨可提高14.8%,相对于四桨可提高31.9%;

4)六桨转向构型不同的螺旋桨转向组合方式,会影响多组螺旋桨总的升力和阻力效应,8种构型中构型1气动性能最优。

参考文献:

- [1] CLARKE M A, ERHARD R M, SMART J T, et al. Aerodynamic optimization of wing-mounted propeller configurations for distributed electric propulsion architectures [C]//AIAA Aviation 2021 Forum. Virtual Event. Reston, Virginia; AIAA, 2021: 2471.
- [2] WALES C, JONES D, GAITONDE A, et al. Comparison of aircraft loads using URANS and actuator disk modelling of propellers [C]//AIAA Aviation 2022 Forum. Chicago, IL & Virtual. Reston, Virginia; AIAA, 2022: 3684.
- [3] 李博, 梁德旺, 黄国平. 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, 2008, 29(4): 845-852.
- [4] 杨溢. 基于激励盘理论的螺旋桨飞机气动特性快速分析方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [5] 栗枢, 曹广州. 螺旋桨三维积冰对气动特性影响的数值研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(4): 178-182.
- [6] HAHN A. Vehicle sketch pad: a parametric geometry modeler for conceptual aircraft design [C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida. Reston, Virginia; AIAA, 2010: 657.
- [7] MCDONALD R A. Advanced modeling in OpenVSP [C]//16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Washington, D. C. Reston, Virginia; AIAA, 2016.
- [8] VIKEN J K, VIKEN S, DEERE K A, et al. Design of the cruise and flap airfoil for the X-57 maxwell distributed electric propulsion aircraft [C]//35th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Denver, Colorado. Reston, Virginia; AIAA, 2017: 3922.
- [9] SHERIDAN C N, PHAM D D, WHITESIDE S. Evaluation of VSPAERO analysis capabilities for conceptual design of aircraft with propeller-blown wings [C]//Proceedings of the AIAA Aviation 2021 Forum Virtual Event Reston, Virginia; AIAA, 2021: 2510.

收稿日期: 2022-11-07