

电动飞机分布式螺旋桨对气动性能影响的建模研究



宋敏华, 张文琦, 相倩, 王钢林, 李岩

中国航空研究院, 北京 100029

摘要:作为电动飞机的一项关键技术,分布式螺旋桨推进已成为绿色航空未来发展的重要研究方向。本文以结合多参考系(MRF)的RANS方法作为气动性能分析手段,采用Kriging代理模型对分布式螺旋桨的安装位置对全机气动性能的影响进行了建模研究,并对基准构型和优选构型的流动进行了对比分析。结果表明,螺旋桨往前方移动后全机的升阻比增大;相对于原始构型,优选构型的上表面低压区面积明显增大,吸力峰明显增强,下表面的压强增大,低压区域减少,分布式电推进系统的效率得到有效提升。本文的研究能够支撑以分布式螺旋桨为动力的电动飞机的总体设计,为螺旋桨的安装提供有效参考,从而进一步提升电动飞机的经济性。

关键词: 电动飞机; 分布式螺旋桨; Kriging 模型; 气动建模

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.06.003

减排是航空业发展的必然要求,以电动飞机为代表的新一代航空科技在降低飞机的碳排放、提升飞机的气动效率方面相对于传统燃油客机具有极大的优势,可以显著提升飞机的经济性、环保性和舒适性。当前,美国、欧洲及国内都在积极开展电动飞机的研究^[1-2]。分布式电推进系统(DEP)通过驱动多个螺旋桨或风扇为飞机提供推力^[3],是众多在研的电动飞机所采用的推进方式。DEP利用其滑流效应能大幅提升飞机升力,降低机翼面积和结构重量(质量),满足短距起降和长航时飞行需求,提高飞行器性能。国内发布的《电动飞机发展白皮书》中也指出分布式电推进技术是电动飞机的一项关键技术^[4]。

相比于传统螺旋桨飞机,以分布式电推进系统为动力的飞机机翼受螺旋桨滑流影响的区域更大,螺旋桨滑流的影响更加显著^[5]。美国国家航空航天局(NASA)在最近10余年来针对分布式螺旋桨开展了大量相关技术研究。M. D. Patterson等^[6-7]验证涡格法对螺旋桨数值模拟的有效性,并搭建分布式螺旋桨概念设计分析与优化框架。K. R. Moore和N. K. Borer等^[8-9]采用涡格法对分布式螺旋桨推进系统进行了总体概念设计与优化研究。国内王科雷等^[10-12]

研究了分布式螺旋桨滑流对太阳能无人机的气动影响,并针对螺旋桨的载荷分布进行了优化分析。饶崇等^[13]提出了一种分布式电推进螺旋桨飞机,并基于多参考系(MRF)方法,对低速特性进行数值模拟,研究分布式螺旋桨滑流效应对全机气动特性的影响规律。杨小川等提出了一种分布式螺旋桨电推进运输机初步方案,并采用等效盘方法对分布式螺旋桨布置方案与机翼流动特性进行了探索^[14],在此基础上进一步研究了在4种分布式螺旋桨旋转组合下的机翼滑流效应^[15]。

当前,大多数关于分布式螺旋桨的研究集中在滑流对机体部件的气动影响和作用机理上,针对分布式电推进系统和机体的气动特性综合设计还存在较大潜力。杨伟等^[16]用等效盘结合重叠网格方法,并基于量子粒子群寻优算法建立分布式螺旋桨布局优化设计系统,对5个前缘分布式螺旋桨组成的构型进行了分布式螺旋桨布局优化设计。本文采用MRF方法对采用分布式螺旋桨的电动飞机全机气动性能进行数值模拟与分析,采用Kriging代理模型对电动飞机的分布式螺旋桨的安装位置进行建模分析,并对基准构型和优选构型的气动性能进行对比研究,为电动飞机分

收稿日期: 2023-03-02; 退修日期: 2023-03-30; 录用日期: 2023-04-20

引用格式: Song Minhua, Zhang Wenqi, Xiang Qian, et al. Modeling research on the influence of distributed propellers on aerodynamic performance of electric aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(06): 20-25. 宋敏华, 张文琦, 相倩, 等. 电动飞机分布式螺旋桨对气动性能影响的建模研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(06): 20-25.

布式螺旋桨安装设计提供参考。

1 数值方法

1.1 控制方程及其离散

本文的流动数值模拟方法基于积分形式的N-S方程,其形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \mathbf{Q} dV + \iint_{\partial\Omega} \mathbf{F}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} dA = \iint_{\Omega} \mathbf{S}(\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} dA$$

式中, Ω 为控制体, $\partial\Omega$ 为控制体的边界, $\mathbf{Q} = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho E)$ 为流动的守恒变量, $\mathbf{F}$ 是通量, $\mathbf{S}$ 是源项。 $\mathbf{n}$ 是网格面的外法线矢量, dA 表示面积分的微元。计算采用雷诺平均方法,采用的湍流模型为SA一方程模型,对流项空间离散采用Roe格式,时间离散采用隐式格式。固壁边界采用无滑移绝热边界,远场边界基于当地黎曼不变量求解。

1.2 MRF 方法

综合计算精度和对计算资源的需求,本文采用MRF方法模拟螺旋桨的旋转。在传统计算流体力学(CFD)方法的基础上,MRF方法引入了旋转坐标系,因此在方程中引入了源项(科式加速度和向心加速度),源项为

$$\mathbf{S}(\mathbf{Q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\rho[2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U} + (\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}))] \\ \rho \mathbf{U} \nabla (0.5\omega^2 r^2) \end{bmatrix}$$

式中, $\mathbf{r}$ 是位置矢量, $\boldsymbol{\omega}$ 是旋转角速度, $\mathbf{U}$ 是流体单元的相对运动速度矢量。

1.3 算例验证

采用某双叶螺旋桨对本文的螺旋桨流动数值模拟方法进行验证,螺旋桨及短舱等部件的外形如图1所示,该模型在美国Wichita州立大学的低速风洞中进行了试验^[17]。桨叶直径为0.3048m,75%展向位置的桨距角为20°。

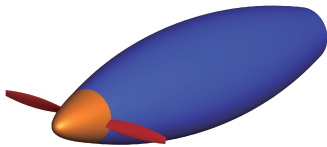


图1 螺旋桨及短舱几何外形

Fig.1 Geometry of the propeller and nacelle

计算网格分两部分生成,即包括螺旋桨的圆柱形区域和剩余部分所在的静止域。物面棱柱层第一层网格高度为 4.0×10^{-6} m,预估的 $y^+ \approx 1$,棱柱网格最少10层,法向增长率为1.2。在螺旋桨及其尾迹区域进行适当加密,以增强对滑流的捕捉。静止域和螺旋桨表面网格如图2所示,螺旋桨所在的区域网格单元数约为150万个,全场网格单元共

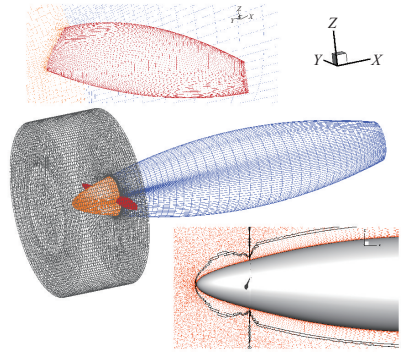


图2 表面和空间网格分布

Fig.2 Surface and volume mesh distribution

约440万个。

螺旋桨桨叶性能参数(拉力系数 C_T 、功率系数 C_P 及效率 η)以及工作条件(前进比 J)的定义如下

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5}, C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, J = \frac{V}{nD}, \eta = \frac{JC_T}{C_P}$$

式中, T, P 分别为螺旋桨拉力和螺旋桨功率; ρ, V 分别为自由来流的速度和密度, n 和 D 分别为螺旋桨转速(rev/s)和桨叶直径。

螺旋桨转速为6000r/min,来流沿轴向方向,速度根据前进比确定。螺旋桨桨叶的性能计算结果与试验结果对比如图3所示。在不同的前进比下,MRF计算获得的拉力系数、功率系数和螺旋桨效率结果与试验基本吻合,验证了本文所采用的数值方法的准确性。

2 分布式螺旋桨位置对气动特性的影响

2.1 模型与网格

几何模型如图4所示,包括机身、机翼、垂尾、平尾和5个螺旋桨,螺旋桨旋转矢量沿 X 方向。每个螺旋桨均包含三片桨叶。

采用混合网格对全机构型进行模拟。带螺旋桨构型的表面网格的网格细节如图5所示。除螺旋桨区域外,无螺旋桨构型的表面网格分布保持一致。为了提高对螺旋桨区域流动的捕捉,对5个包围螺旋桨的圆柱形网格区域及其尾迹区域进行了加密,第一层网格高度为 5.6×10^{-6} m。带动力和不带动力构型的网格量分别约为 1.16×10^7 个和 2.02×10^7 个。每个包含螺旋桨的圆柱区域网格内的网格单元为 2.26×10^6 个。

2.2 气动建模与分析

来流速度 $U_\infty = 39$ m/s, $H = 0$,迎角 $\alpha = 6^\circ$,螺旋桨转速为6000r/min。采用Kriging代理模型,对螺旋桨的安装位置进

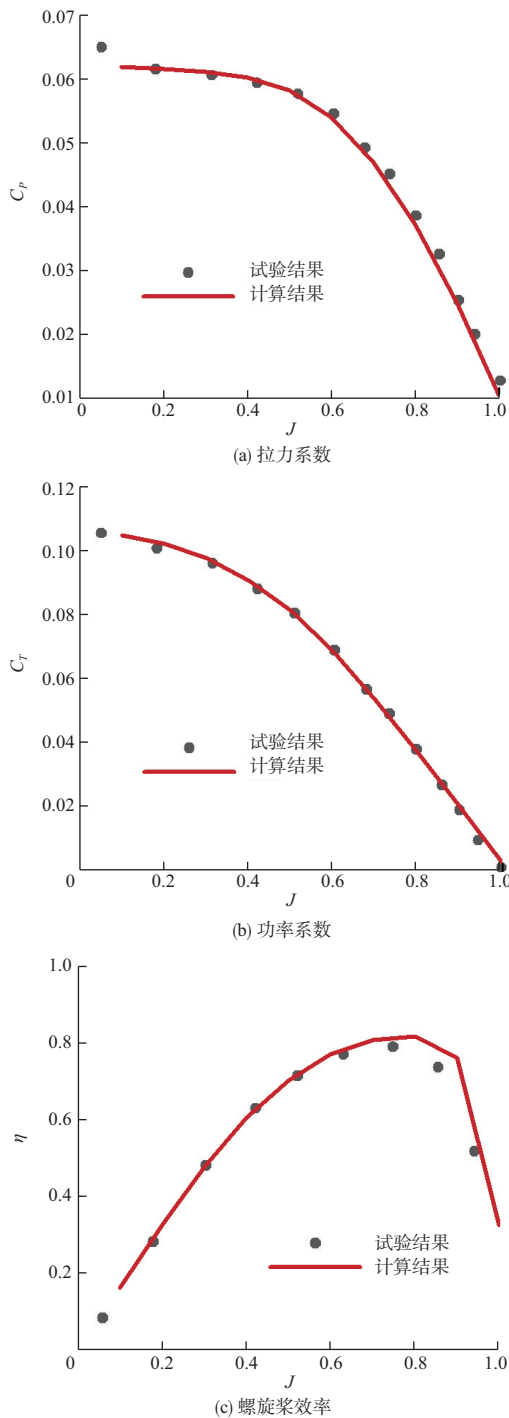


图3 计算结果和试验值对比

Fig.3 Comparison between computed and experimental results

行建模。变量为螺旋桨在流向(X 方向)和纵向(Z 方向)相对于基准构型位置的变化量。相对于基准构型,螺旋桨在流向和纵向的变化范围分别为 $\Delta x \in (-0.4, 0.0)$ 、 $\Delta z \in (-0.1, 0.2)$ 。采用拉丁超立方方法进行采样,选取样本点 50 个。建立的升

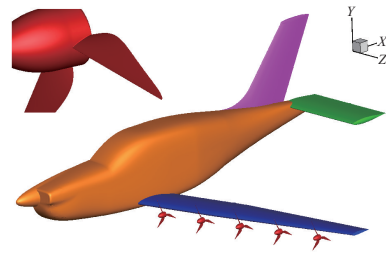


图4 飞机几何外形

Fig.4 Aircraft geometry

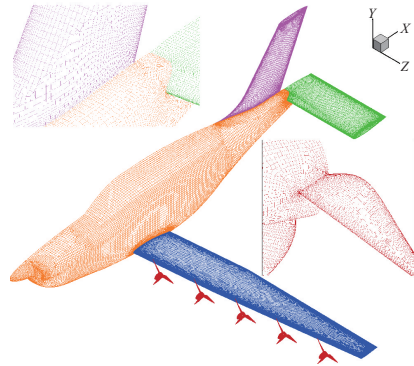


图5 表面网格分布

Fig.5 Surface mesh distribution

力、阻力和力矩的代理模型如图 6 所示。

可以看出,螺旋桨的安装位置相对于基准构型向前上方移动后,升力系数明显增大,在向上方移动时,阻力系数增大,向前下方移动时,阻力系数减少。总体来看,螺旋桨往前方移动后全机的升阻比增大。分布式螺旋桨的安装位置和气动性能之间的相关系数见表 1。升力系数与流向、纵向位置都存在较强的相关性,纵向位置对阻力系数有明显的影响,流向位置与阻力系数的相关性较小。

电动飞机分布式螺旋桨的主要功能是提供升力,因此其关键指标是升力系数增量,选取性能较优样本点(样本点 19, $\Delta x = -0.3966\text{m}$, $\Delta z = 0.1921\text{m}$)与基准构型进行对比,气动性能对比见表 2。可以看出,优选样本点的升力系数和阻力系数都增加,但是升力系数的增量更大,超过 34%,升阻比也提升了接近 20%。

上、下表面的压力分布对比如图 7 所示,1/4 弦长处的压

表 1 安装位置和气动性能之间的相关系数

Table 1 Correlation between installation position and aerodynamic performance

	C_L	C_D	C_{M_y}
Δx	-0.575	0.193	0.511
Δz	0.835	0.929	-0.873

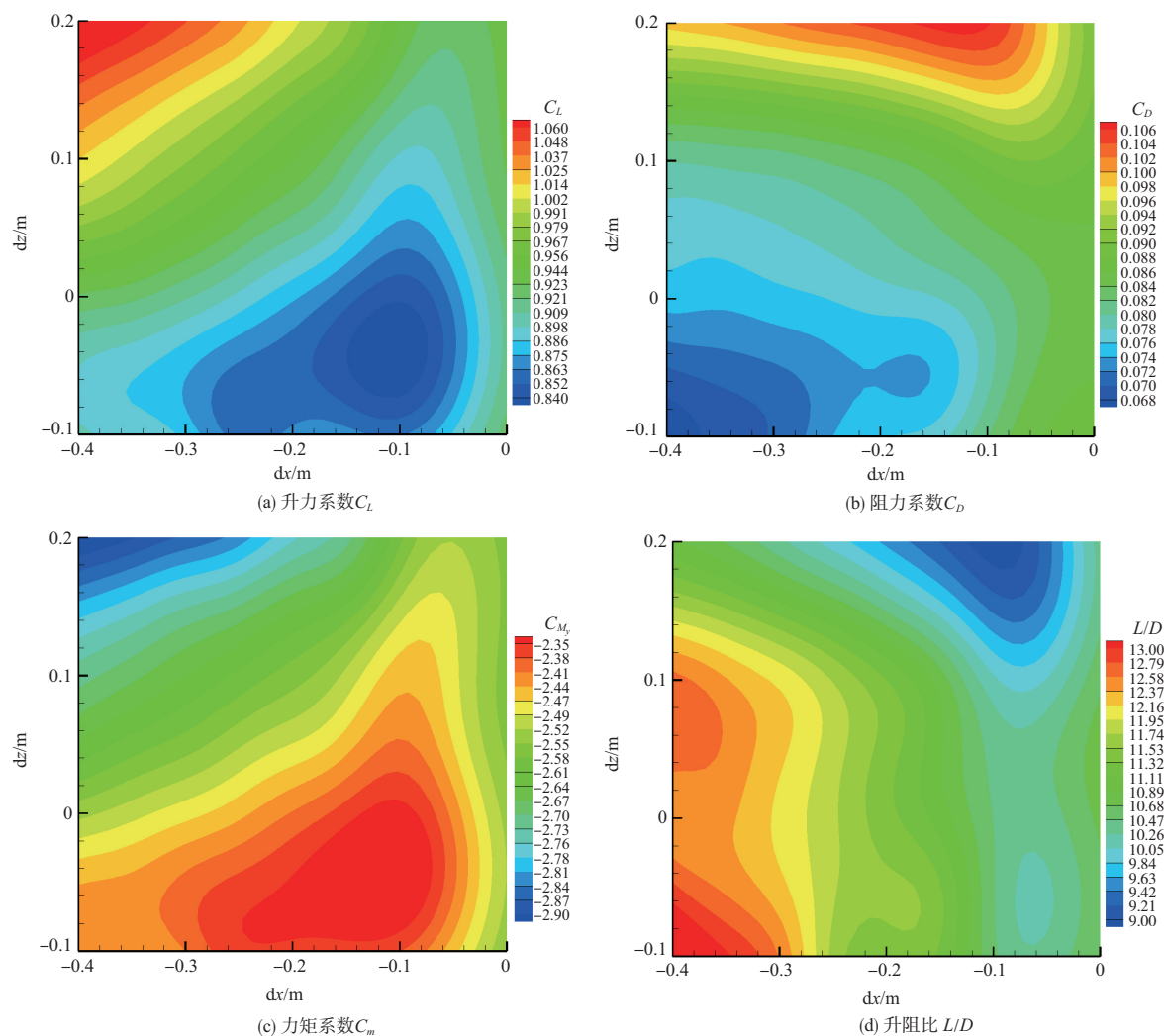


图6 全机气动性能代理模型预测结果
Fig.6 Aerodynamic performance of full aircraft predicted by surrogate model

力系数对比如图8所示。可以看出,样本点19上表面的低压区面积明显增大,吸力峰明显增强。在下表面,压强增大,低压区区域减小,从而在基准构型的基础上升力明显增大。

表2 样本点19与基准构型的性能对比
Table 2 Performance comparison between the 19th sample and baseline

	C_L	C_D	L/D
基准构型	0.80102	0.08581	9.33481
样本点19	1.07967	0.09711	11.1180
变化量	34.79%	13.17%	19.10%

3 结论

本文针对电动飞机的分布式螺旋桨,采用结合MRF的RANS方法进行模拟,并采用Kriging代理模型对螺旋桨位

置对气动性能的影响开展建模分析。通过研究,可以得到以下结论:

- (1)在基准构型的基础上,分布式电推进系统往前上方移动后,升力系数明显增大,在向上方移动时,阻力系数增大。总体来看,螺旋桨往前方移动后全机的升阻比增大,相对增大了接近20%。
- (2)相对于原始构型,分布式螺旋桨往前上方移动后的优选构型上表面的低压区面积明显增大,吸力峰明显增强。在下表面,压强增大,低压区区域减小,升力明显增大,分布式电推进系统的效率得到有效提升。



参考文献

[1] 杨凤田,范振伟,项松,等. 中国电动飞机技术创新与实践[J].

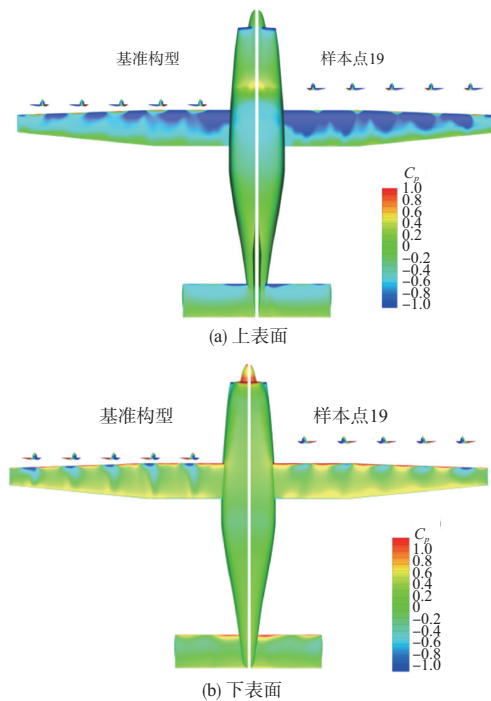


图7 基准构型和样本点DoE 19表面压力分布对比

Fig.7 Comparison of surface pressure distribution between baseline and sample DoE 19

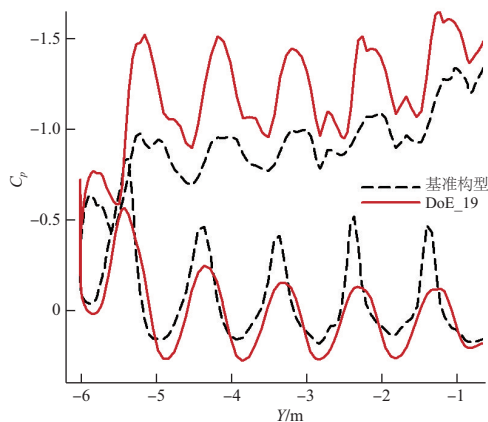


图8 1/4弦长处的压力系数对比

Fig.8 Comparison of pressure coefficient at 1/4 chord length

航空学报, 2021, 42(3):624619.

Yang Fengtian, Fan Zhenwei, Xiang Song, et al. Technical innovation and practice of electrical aircraft in China[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3):624619. (in Chinese)

- [2] 纪宇晗, 孙侠生, 俞笑, 等. 双碳战略下的新能源航空发展展望[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12):1-11.

Ji Yuhang, Sun Xiasheng, Yu Xiao, et al. Development prospect of new energy aviation under carbon peaking and carbon

neutrality goals[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12):1-11. (in Chinese)

- [3] 黄俊. 分布式电推进飞机设计技术综述[J]. 航空学报, 2021, 42(3):624037.

Huang Jun. Survey on design technology of distributed electrical propulsion aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3):624037. (in Chinese)

- [4] 孙侠生, 程文渊, 穆作栋, 等. 电动飞机发展白皮书[J]. 航空科学技术, 2019, 30(11):1-7.

Sun Xiasheng, Cheng Wenyuan, Mu Zuodong, et al. White paper on the development of electric aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11):1-7. (in Chinese)

- [5] Stoll A M, Bevirt J B, Moore M D, et al. Drag reduction through distributed electric propulsion[C]. 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2014.

- [6] Patterson M D, German B. Wing aerodynamic analysis incorporating one-way interaction with distributed propellers[C]. 14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2014.

- [7] Patterson M D, Daskilewicz M J, Germanz B J. Conceptual design of electric aircraft with distributed propellers: Multidisciplinary analysis needs and aerodynamic modeling development[C]. 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014.

- [8] Moore K R, Ning A. Distributed electric propulsion effects on existing aircraft through multidisciplinary optimization[C]. 2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2018.

- [9] Borer N K, Moore M D. Integrated propeller-wing design exploration for distributed propulsion concepts [C]. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015.

- [10] 王科雷, 祝小平, 周洲, 等. 低雷诺数分布式螺旋桨滑流气动影响[J]. 航空学报, 2016, 37(9):2669-2678.

Wang Kelei, Zhu Xiaoping, Zhou Zhou, et al. Distributed electric propulsion slipstream aerodynamic effects at low Reynolds number[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9):2669-2678. (in Chinese)

- [11] 王科雷, 周洲, 祝小平, 等. 低雷诺数多螺旋桨/机翼耦合气动设计[J]. 航空学报, 2018, 39(8):121918.

Wang Kelei, Zhou Zhou, Zhu Xiaoping, et al. Multi-propeller/wing coupled aerodynamic design at low Reynolds number[J].

- Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(8):121918. (in Chinese)
- [12] Wang Kelei, Zhou Zhou, Fan Zhongyun, et al. Aerodynamic design of tractor propeller for high-performance distributed electric propulsion aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(10):20-35.
- [13] 饶崇, 张铁军, 魏闯, 等. 一种分布式电动飞机螺旋桨滑流影响机理[J]. 航空学报, 2021, 42(S1):726387.
- Rao Chong, Zhang Tiejun, Wei Chuang, et al. Influence mechanism of propeller slipstream on wing of a distributed electric aircraft scheme [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(S1):726387. (in Chinese)
- [14] 杨小川, 李伟, 王运涛, 等. 一种分布式螺旋桨运输机方案及其滑流效应研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(2):361-368.
- Yang Xiaochuan, Li Wei, Wang Yuntao, et al. Research on aerodynamic shape design scheme of a distributed propeller transport aircraft and its slipstream effect[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(2): 361-368. (in Chinese)
- [15] 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.
- Yang Xiaochuan, Wang Yuntao, Meng Dehong, et al. Study on wing slipstream effects of distributed propellers with different rotating directions[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(1): 89-98. (in Chinese)
- [16] 杨伟, 范召林, 吴文华, 等. 考虑滑流影响的分布式螺旋桨布局优化设计[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(3):71-79.
- Yang Wei, Fan Zhaolin, Wu Wenhua, et al. Optimal design of distributed propeller layout considering slipstream effect[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(3): 71-79. (in Chinese)
- [17] Ghoddoussi A, Miller L S. A more comprehensive database for low Reynolds number propeller performance validations[C]. 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2016.

Modeling Research on the Influence of Distributed Propellers on Aerodynamic Performance of Electric Aircraft

Song Minhua, Zhang Wenqi, Xiang Qian, Wang Ganglin, Li Yan

Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China

Abstract: As a key technology of electric aircraft, distributed propeller propulsion has become an important research direction of green aviation in the future. In this paper, RANS method combined with Multiple Reference Frames (MRF) is employed for the aerodynamic performance prediction and Kriging surrogate model is used to model and analyze the influence of distributed propeller's installation position on the aerodynamic performance of electric aircraft. The flow of the baseline configuration and the optimal installation position layout is compared and analyzed. Results show that the lift-to-drag ratio of the full aircraft increases after the propellers move forward. Compared with the baseline configuration, the upper surface low pressure area of the preferred configuration is significantly increased and the suction peak is enhanced, while the pressure on the lower surface is increased and the low pressure area is reduced, so that the efficiency of the distributed electric propulsion system is effectively improved. The research in this paper can support the configuration design of electric aircraft powered by distributed propellers and provide useful reference for the propellers' installation, so as to improve the economy of electric aircraft.

Key Words: electric aircraft; distributed propeller; Kriging model; aerodynamic modeling