

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.04.014

翼型加厚对桨扇性能的影响研究

徐猛, 李博, 邱宇宸, 姜东晨, 许尹

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为研究翼型加厚对桨扇性能的影响,通过两种不同的加厚方式对桨扇翼型进行加厚,采用 NUMECA 软件对加厚前后的对转桨扇进行三维流场数值模拟,对比加厚前后对转桨扇的性能变化。结果表明:在同一飞行状态下,无论是翼型整体加厚,还是只改变翼型最大厚度,对转桨扇的性能都会下降;相比于整体加厚,只改变最大厚度则性能下降得更多;在不同来流攻角条件下,攻角越大,加厚前后的对转桨扇性能差值越大。

关键词:对转桨扇; 开式转子; 翼型加厚; 气动性能; 数值模拟

中图分类号: V211.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)04-0076-06

Study on Influence of Airfoil Thickening on Propeller Performance

XU Meng, LI Bo, QIU Yuchen, JIANG Dongchen, XU Yin

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

Abstract: In order to study the influence of airfoil thickening on the performance of propeller fan, two different thickening methods were adopted to thicken the propeller fan. NUMECA software was applied to simulate the three-dimensional flow field of the rotor fan before and after thickening, and the performance changes of the rotor fan before and after thickening were compared. The results show that the performance of rotor fan, under the same flight condition, will be decreased whether by overall airfoil thickening or by only changing the maximum airfoil thickness. Compared with the overall thickening, the performance of rotor fan will be decreased more when only changing the maximum airfoil thickness. Under the condition of different angle of attack, the larger the angle of attack, the greater the performance difference of the opposite rotor fan before and after thickening.

Keywords: counterrotating paddle fan; open rotor; airfoil thickening; pneumatic performance; numerical simulation

0 引言

在空气动力学领域,飞机机翼平行于飞行器对称面或垂直于前缘的剖面形状,叫做“翼型”^[1]。随着航空飞行器的发展,翼型的概念也被推广到螺旋桨、直升机旋翼等旋转机械上^[2]。20世纪中期超临界翼型原理^[3]的发现促使高速螺旋桨翼型快速发展^[4]。美国刘易斯研究中心提出了“桨扇”的概念,NASA在此基础上研制出SR^[5]高速螺旋桨翼型,随后汉密尔顿基于SR-3单桨扇设计出了CRP系列对转桨扇^[6-8]。2022年袁培博等^[9]研究了转桨扇的直径等设计参数对其性能的影响。现如今通过先进的CFD数值模拟软件可以得到性能最优的螺旋桨型面,但由于结构强度的限制,实际应用中往往不得不对螺旋桨翼型进行加厚操作。

国内外对翼型加厚开展过一些工作,YU等^[10]使用厚度比为翼型弦长4%~20%的NACA翼型,研究了翼型厚度对推力的影响。结果表明对于厚度

比大于9.0%的翼型,压力在推力的产生中起主导作用,黏性力几乎可以忽略不计。KELLOGG等^[11]在不同雷诺数下研究了翼型厚度对气动效率的影响。结果表明:在层流条件下,12%厚翼型与2%厚翼型之间的气动效率相差9%;在湍流条件下,两者之间相差22%。ASHRAF等^[12]通过数值计算研究了翼型厚度对推力和推进效率的影响。结果表明:对于对称翼型,在雷诺数为2万时,增加翼型厚度有利于提高推力和推进效率。BOURISLI等^[13]使用遗传算法来优化NACA翼型厚度函数使升阻系数最大化。MARKS等^[14]在中等雷诺数低速条件下采用建模方法预测了翼型厚度对机翼自噪声的影响,研究发现翼型厚度的增加会导致整体声级的提高,在低迎角时提高幅度最大。国内方面,张佳伟^[15]通过增加风力机翼型厚度,研究了不同攻角时翼型加厚前后的性能变化。结果表明,在大攻角时增加翼型厚度可以扩大翼型的失速范围。刘雄等^[16]以FFA-W3翼型族为研究对象,发现适当增加后缘厚度对气动性

第一作者简介:徐猛(1999—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为叶轮机械气动设计,1156251517@qq.com。

能的影响不大。高超等^[17]选用了3种不同厚度的翼型,分析了翼型相对厚度对翼型升阻力系数等性能参数的影响。结果表明:在小攻角时,增大翼型厚度会使翼型的升阻力系数减小。任旺等^[18]对变后缘厚度翼型进行了LES数值模拟,分析了后缘厚度变化对噪声影响的机理。

由上文不难看出,国外对于翼型厚度的研究大多集中在二维翼型或机翼的厚度对气动性能和噪声的影响。国内方面的研究以风力机叶片翼型厚度对气动性能的影响居多。关于翼型加厚对桨扇推进效率等性能参数的影响国内外都很少提及,本文通过对一种对转桨扇的翼型整体加厚和只改变最大厚度两种加厚方式,分析了翼型厚度对桨扇气动性能的影响。

1 研究对象及计算方法

1.1 物理模型

本文研究对象为一种前后级叶片均为8叶的对转桨扇。桨扇型面参考UCT^[19]的SR-3对转桨扇设计,自桨扇叶根至叶尖选取了21个截面,每个截面选取不同的弦长和厚度,表1为桨扇的主要设计参数。图1为对转桨扇的物理模型(其中黄色为前桨、紫色为后桨),前后级功率比为5:4,前桨桨距角60.4°、后桨桨距角55.3°(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

表1 桨扇主要设计参数

参数	数值
叶尖半径/m	2.2
轮毂半径/m	0.528
进距比	3.46
轮毂比	0.24
前后级叶片数	8
设计点转速/(r/min)	850



图1 对转桨扇的物理模型

1.2 计算方法

本文采用NUMECA的FINE/Turbo求解器进行数值计算。湍流模型采用Spalart-Allmaras(S-

A)模型。在设置边界条件时,桨扇和轮毂均采用无滑移壁面条件,对转桨扇旋转速度为设计点的速度,沿来流方向看,前桨顺时针旋转,后桨逆时针旋转。计算状态选取 $H=10\text{ km}$, $P_0=26\ 499.9\text{ Pa}$, 温度 $T_0=223.25\text{ K}$, $Ma=0.72$ 。

1.3 网格无关性验证

网格划分均采用NUMECA公司的网格生成器AutoGrid5生成,远场网格和对转桨扇叶片网格如图2所示。

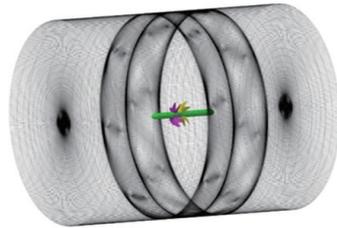


图2 对转桨扇网格示意图

为了避免网格的疏密程度对仿真结果产生干扰,对数值模型进行网格敏感性分析(图3)。图中 F 代表螺旋桨拉力, N; M_z 代表螺旋桨转距, Nm。从图3可以看出,当网格量增加到1 200万后,继续增大网格数量对计算结果的影响较小。为了减少计算资源和时间,本文所有的计算网格采用1 200万。

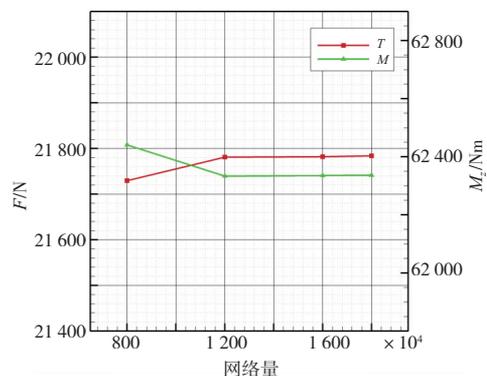


图3 网格敏感性验证

2 计算结果及分析

对于翼型整体加厚和只改变翼型最大厚度这两种加厚方式,分别选取了3组不同的翼型厚度,5个不同的桨扇转速以及5个来流攻角,共150个状态点,分析翼型加厚对桨扇性能的影响规律。

2.1 翼型整体加厚

气动设计的桨扇型面尾缘最小厚度为

0.14 mm, 缩比为试验模型大小后桨尖尾缘最小厚度0.01 mm。从桨扇结构强度和材料刚度多方面综合考虑, 需要对桨扇型面进行加厚处理, 使对

转桨扇全尺寸模型满足强度要求, 全尺寸模型加厚前后数据对比如表2所示。

表2 不同厚度翼型参数对比

名称	偏移量 δ/mm	尾缘厚度 θ/mm	翼型厚度变化量/%			翼型弦长变化量/%		
			叶根	叶中	叶尖	叶根	叶中	叶尖
初始型面	0.00	0.14	—	—	—	—	—	—
第一次加厚	0.80	1.74	1.35	8.59	22.54	0.18	0.15	0.40
第二次加厚	3.45	7.02	5.83	37.06	97.30	0.80	0.63	1.75

1) 整体加厚参数对比

加厚操作在三维造型软件 CATIA 中使用偏移翼型型线的方法完成, 这种加厚方式不仅改变翼型整体厚度, 翼型的弦长也发生变化。加厚桨扇翼型对比如图4所示, 其中红色为初始翼型, 蓝色为偏移之后的翼型。

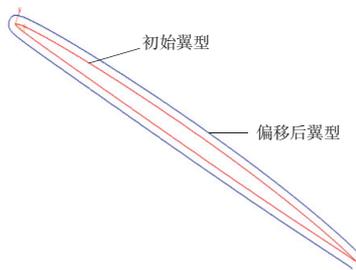


图4 翼型加厚前后对比

2) 整体加厚对桨扇气动性能的影响

对整体加厚前后的3组对转桨扇进行数值模拟, 计算结果列于表3。图5为 0° 攻角时对转桨

扇的性能参数随进距比的变化曲线。从图5(a)可知, 随着翼型的加厚, 桨扇的拉力系数逐渐减小, 并且进距比越大这种减小趋势越明显。以 $J=3.09$ 为例, 桨扇的两次加厚拉力系数分别下降0.19%、0.87%; $J=3.79$ 时, 桨扇的两次加厚拉力系数分别下降4.06%、8.40%。这是因为进距比大意味着桨扇转速小, 相同来流条件下加厚的桨扇迎角更小, 导致产生的拉力减小。由图5(b)可知, 大进距比时翼型加厚对功率系数的影响不大, 小进距比时翼型加厚功率系数略有上升。由图5(c)可以看出3种厚度的桨扇推进效率都是随着进距比的增大, 呈现先增大后减小的趋势, 并且在设计进距比 $J=3.46$ 处取得最高效率。进距比较小时, 翼型加厚推进效率下降较小, 随着进距比增大, 翼型加厚之后的推进效率 η 下降幅度逐渐变大。初始型面和偏移量 $\delta=3.45\text{ mm}$ 的对转桨扇型面相比, $J=3.09$ 时 η 下降1.88个百分点, $J=3.79$ 时效率 η 下降4.67个百分点。

表3 不同厚度桨扇计算结果

进距比 J	$\delta=0\text{ mm}$			$\delta=0.80\text{ mm}$			$\delta=3.45\text{ mm}$		
	C_T	C_P	η	C_T	C_P	η	C_T	C_P	η
3.79	0.37	1.77	79.09	0.35	1.72	77.88	0.34	1.73	74.42
3.67	0.49	2.16	82.83	0.47	2.13	82.03	0.46	2.15	79.53
3.46	0.70	2.86	84.71	0.69	2.85	84.23	0.69	2.90	82.42
3.26	0.88	3.46	83.50	0.88	3.46	83.11	0.88	3.51	81.44
3.09	1.03	3.92	81.20	1.03	3.93	80.86	1.02	3.98	79.32

3) 整体加厚对桨扇攻角性能的影响

图6为10 km高空、来流马赫数为0.72、攻角分别为 0° 、 2° 、 4° 、 6° 、 8° 时对转桨扇推进效率随进距比变化曲线。不难看出, 对于同一厚度的对转桨扇, 随着来流攻角的增加, 桨扇的效率逐渐下

降, 以设计点进距比 $J=3.46$ 为例, 对于性能最好的初始型面, 随攻角增加推进效率 η 依次下降0.68个百分点、0.76个百分点、1.50个百分点、2.3个百分点; 同时随着攻角的增加, 加厚型面与初始型面推进效率的差值也随之增加。以 $J=3.79$ 为

例,2°攻角时,偏移量 $\delta=3.45$ mm的对转桨扇型面推进效率 η 与初始型面相比下降 5.06 个百分点,4°攻角时推进效率下降 5.52 个百分点,6°攻角时推进效率下降 6.01 个百分点,8°攻角时推进效率

下降 6.51 个百分点。这是因为随着攻角的增加,桨扇的迎角逐渐减小,并且在大攻角时加厚对转桨扇的后桨叶尖处更容易出现负迎角,产生局部负拉力,导致推进效率急剧下降。

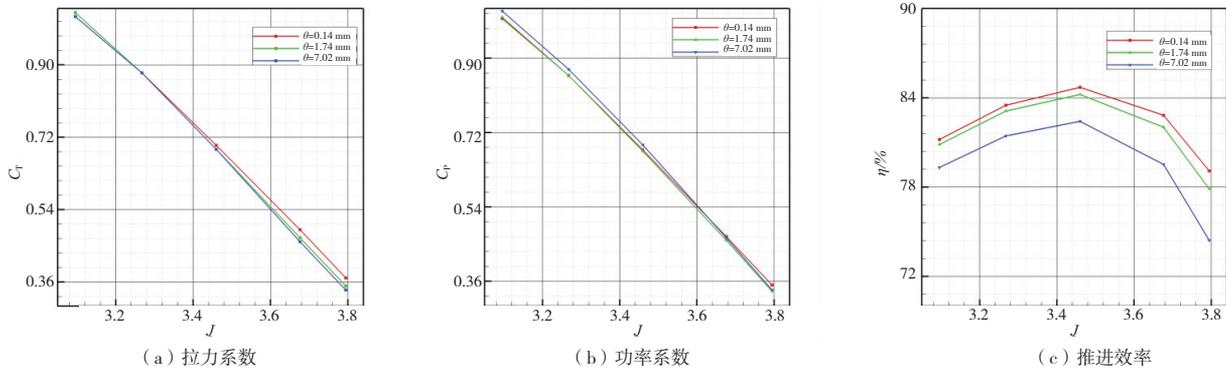


图 5 0° 攻角下整体加厚桨扇性能随进距比变化

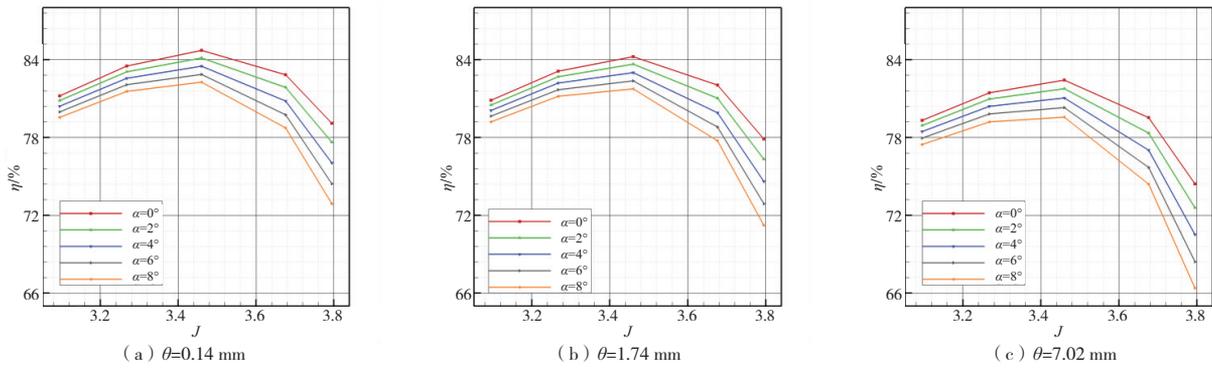


图 6 不同攻角下桨扇效率变化

图 7 为设计点对转桨扇在 0° 来流攻角下的表面压力分布云图。蓝色为低压区,红色为高压区。

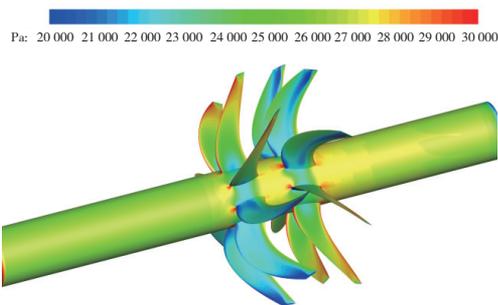


图 7 对转桨扇表面压力分布图

选取偏移量 $\delta=3.45$ mm 的对转桨扇型面在相对叶高 0.75 处做切面,图 8 为 $J=3.79$ 时 0.75 叶高截面处不同攻角下的压力分布云图。从图中可以看出随着来流攻角的增加,前桨拉力有增大

的趋势。这是由于水平方向速度分量的减小导致前桨的迎角变大,所以前桨的拉力有小幅度的增加,但同时也影响到了后桨的流场分布,加厚对转桨扇型面的后桨前缘处在 2°攻角时已经产生了局部的负压区,随着来流攻角的增加,负压区越来越大,导致对转桨扇的推进效率迅速下降。

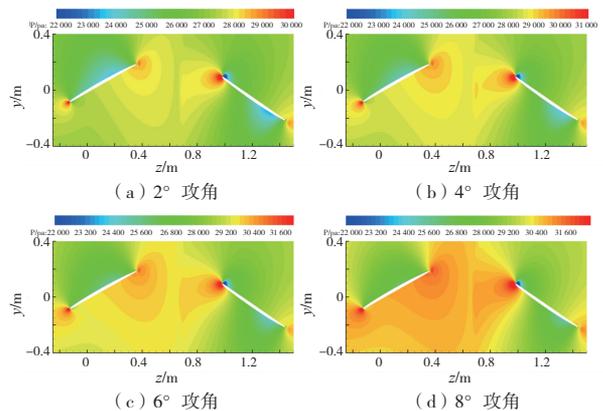


图 8 0.75 叶高截面压力分布

2.2 改变翼型最大厚度

利用螺旋桨型面生成程序,改变翼型的最大厚度,这种加厚方式与偏移型线的区别在于翼型的弦长保持不变,以初始型面的最大厚度 t 为基准,分别将最大厚度改为 $1.25t$ 和 $1.50t$,对比分析对转桨扇3种不同最大厚度下的性能变化规律。图9为翼型加厚前后对比图。

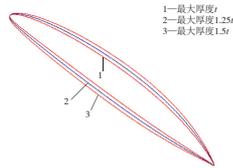


图9 不同厚度比翼型

1) 最大厚度对桨扇气动性能的影响

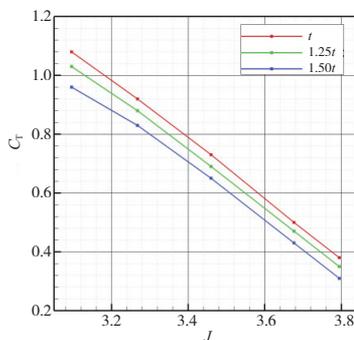
在10 km高空、0.72来流马赫数条件下,对3

组不同最大厚度的对转桨扇进行数值模拟计算,计算结果如表4所示。

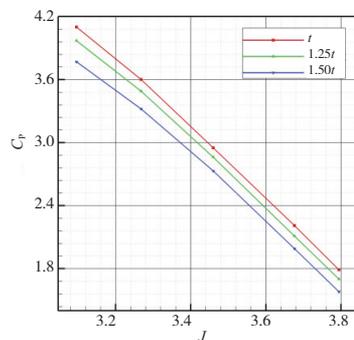
图10为 0° 攻角时不同最大厚度对转桨扇的性能参数随进距比的变化曲线。由图10可知,不同最大厚度对转桨扇的拉力系数和功率系数都随着进距比的增大逐渐减小。在同一进距比下,随着翼型最大厚度的增加,拉力系数和功率系数呈现等比例减小的趋势。这是由于改变翼型的最大厚度时弦长保持不变,加厚的翼型与原翼型不再相似,不能在同一来流状态下保持最佳的性能。此外,3组最大厚度对转桨扇的推进效率随着进距比的增加都呈现先增大后减小的趋势。对于最大厚度 $1.25t$ 和 $1.50t$ 的对转桨扇来说,虽然翼型不再与初始型面翼型相似,但桨扇的桨叶角没有发生变化,所以依然能在设计进距比点取得最高效率。

表4 不同最大厚度桨扇计算结果

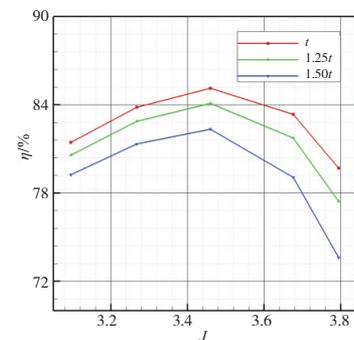
进距比 J	最大厚度 t			最大厚度 $1.25t$			最大厚度 $1.50t$		
	C_T	C_P	η	C_T	C_P	η	C_T	C_P	η
3.79	0.38	1.79	79.69	0.35	1.70	77.43	0.31	1.58	73.61
3.67	0.50	2.21	83.35	0.47	2.11	81.73	0.43	1.99	79.06
3.46	0.73	2.95	85.12	0.69	2.86	84.10	0.65	2.73	82.34
3.26	0.92	3.60	83.83	0.88	3.49	82.87	0.83	3.32	81.34
3.09	1.08	4.10	81.44	1.03	3.97	80.58	0.96	3.77	79.24



(a) 拉力系数



(b) 功率系数



(c) 推进效率

图10 0° 攻角不同最大厚度对转桨扇性能

2) 最大厚度对桨扇攻角性能的影响

对于3组不同最大厚度的对转桨扇,在 $H=10\text{ km}$ 、 $P_0=26\ 499.9\text{ Pa}$ 、温度 $T_0=223.252\text{ K}$ 、 $Ma=0.72$ 来流条件下,选取飞行攻角 0° 、 2° 、 4° 、 6° 、 8° ,对比分析不同攻角下对转桨扇的性能参数随进距比的变化规律。图11为3组不同最大厚度的对转桨扇在来流攻角由 $0^\circ \sim 8^\circ$ 时,对转桨扇的推进

效率随进距比的变化曲线。由图可知,随着进距比的增加,推进效率一直保持先增大后减小的趋势。当 8° 攻角时, $1.50t$ 最大厚度的对转桨扇最高效率点开始向进距比小的方向偏移。这是由于攻角增加,来流速度在轴向的分量减小,导致此时桨扇每个截面处的速度三角形与设计点产生偏差,所以最高效率点对应的进距比发生变化。另

外在同一进距比下,不同最大厚度的对转桨扇推进效率都会随着飞行攻角的增大逐渐下降。以 $1.25t$ 最大厚度的对转桨扇在进距比 $J=3.46$ 为例, 2° 飞行攻角时推进效率 $\eta=83.38\%$, 4° 攻角时推进效率 $\eta=82.55\%$, 6° 攻角时推进效率 $\eta=81.65\%$, 8° 攻角时推进效率 $\eta=80.72\%$;并且随着进距比的增加,不同攻角下加厚前后的对转桨扇效率差值越来越大。以进距比 $J=3.79$ 为例, 2° 攻角时 $1.50t$ 最大厚度的对转桨扇相比于初始 t

最大厚度的对转桨扇推进效率下降 7.1 个百分点, 4° 攻角时推进效率下降 8.1 个百分点, 6° 攻角时推进效率下降 10.3 个百分点, 8° 攻角时推进效率下降 12.4 个百分点。由此可见,改变最大厚度相比于整体加厚性能下降更多。

图 12 为 3 种不同最大厚度的桨扇翼型附近流线图,可以发现气流绕流良好,改变翼型最大厚度没有造成气流分离。

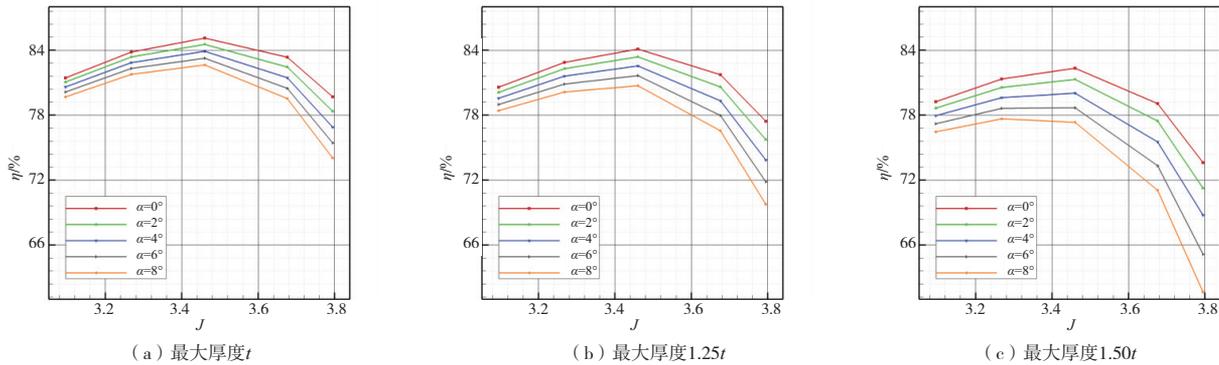


图 11 不同攻角下最大厚度对桨扇效率影响

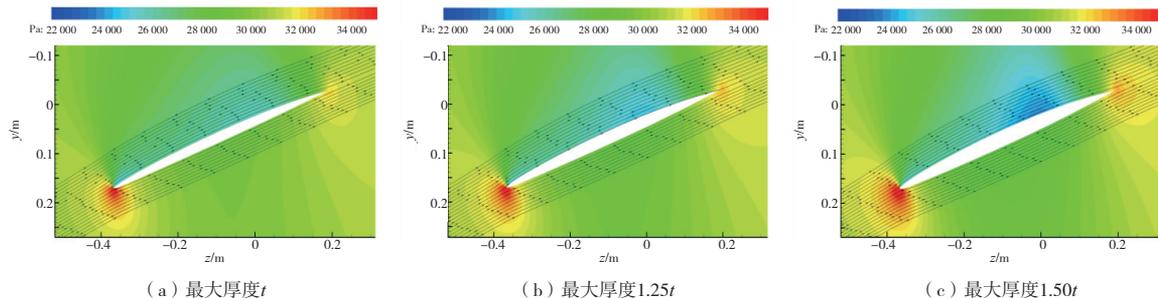


图 12 不同最大厚度桨扇 0.75 叶高处流线图

3 结语

针对两种不同的翼型加厚方式对桨扇气动特性的影响做了数值仿真研究,结论如下:

1) 对于偏移翼型型线整体加厚的桨扇翼型,加厚之后对转桨扇的拉力系数在小进距比时小幅下降,大进距比时下降幅度增大,功率系数基本保持不变;推进效率下降明显,并且进距比越大效率下降越多。随着来流攻角的增大,加厚前后对转桨扇的效率差值也变大;

2) 对于弦长不变,只改变翼型最大厚度的加厚方式,翼型加厚对转桨扇的拉力系数和功率系数等比例下降。在 0° 攻角时推进效率依然能在设计进距比点取得最大值,但随着来流攻角增大

到 8° 时,最高效率点向进距比减小方向移动;

3) 两种翼型加厚方式下对转桨扇的气动性能均会变差,但只改变最大厚度与整体加厚相比推进效率会多下降 4~6 个百分点,因此实际应用时建议采用型线偏移加厚的方式。

参考文献:

- [1] 韩忠华,高正红,宋文萍,等.翼型研究的历史、现状与未来发展[J].空气动力学学报,2021,39(6):1-36.
- [2] 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.
- [3] HARRIS C D. Nasa supercritical airfoils: a matrix of family - related airfoils [R]. Houston, Texas: NASA, 1990.

(下转第 128 页)

- [8] SRINIVAS A, LIN T Y, PARMAR N, et al. Bottleneck transformers for visual recognition [C] // 2021 IEEE/ CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nashville, TN, USA; IEEE, 2021; 16514-16524.
- [9] TU Z Z, TALEBI H, ZHANG H, et al. MaxViT: multi-axis vision transformer [M] // Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022; 459-479.
- [10] XIE S N, GIRSHICK R, DOLLÁRP, et al. Aggregated residual transformations for deep neural networks [C] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, HI, USA; IEEE, 2017; 5987-5995.
- [11] KRIZHEVSKY A, HINTON G. Learning Multiple Layers of Features from Tiny Images [R]. Technical Report TR - 2009. Toronto: University of Toronto, 2009; 32-33.
- [12] NILSBACK M E, ZISSERMAN A. Automated flower classification over a large number of classes [C] // 2008 Sixth Indian Conference on Computer Vision, Graphics & Image Processing. Bhubaneswar, India; IEEE, 2008; 722-729.
- [13] LE Y, YANG X S. Tiny imagenet visual recognition challenge [J]. Computer Science, 2015, 7(7): 3-6.

收稿日期:2023-02-01

~~~~~

(上接第 81 页)

- [ 4 ] HICKS R M, HENNE P A. Wing design by numerical optimization [ J ]. Journal of Aircraft, 1978, 15 ( 7 ): 407-412.
- [ 5 ] ROHRBACH C. A report on the aerodynamic design and wind tunnel test of a Prop - Fan model [ C ] // 12th Propulsion Conference. Palo Alto, CA, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1976; 667-678.
- [ 6 ] WAINAUSKI H, VACZY C. Aerodynamic performance of a counter rotating Prop-Fan [ C ] // 22nd Joint Propulsion Conference. Huntsville, AL, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1986; 1550-1560.
- [ 7 ] HANNIGAN T, WAINAUSKI H. Wind tunnel results of counter rotation prop-fans designed with lifting line and Euler code methods [ C ] // 27th Joint Propulsion Conference. Sacramento, CA, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1991; 2499-2505.
- [ 8 ] 陈博, 贺象. 国外桨扇技术发展概况 [ J ]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(1): 54-58.
- [ 9 ] 袁培博, 李博, 汤宏宇, 等. 一种高速对转桨扇的设计参数对性能的影响 [ J ]. 机械制造与自动化, 2022, 51(3): 159-163, 177.
- [ 10 ] YU M L, WANG Z J, HU H. Airfoil thickness effects on the thrust generation of plunging airfoils [ J ]. Journal of Aircraft, 2012, 49(5): 1434-1439.
- [ 11 ] KELLOGG M, BOWMAN J. Parametric design study of the thickness of airfoils at Reynolds numbers from 60,000 to 150,000 [ C ] // 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2004; 1054-1061.
- [ 12 ] ASHRAF M, YOUNG J, LAI J. Effect of airfoil thickness, camber and Reynolds number on plunging airfoil propulsion [ C ] // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida. Reston, Virginia: AIAA, 2009; 1274-1283.
- [ 13 ] BOURISLI R I, HAMADEH F Z. Optimizing NACA airfoil thickness function parameters for maximum lift-to-drag ratio [ C ] // AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, FL. Reston, Virginia: AIAA, 2020; 1297-1303.
- [ 14 ] MARKS C R, RUMPFKEIL M P, REICH G W. Predictions of the effect of wing camber and thickness on airfoil self - noise [ C ] // 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Atlanta, GA. Reston, Virginia: AIAA, 2014; 3299-3317.
- [ 15 ] 张佳伟. 翼型厚度对气动性能的影响 [ J ]. 电站系统工程, 2021, 37(2): 5-7.
- [ 16 ] 刘雄, 陈严, 叶枝全. 增加风力机叶片翼型后缘厚度对气动性能的影响 [ J ]. 太阳能学报, 2006, 27(5): 489-495.
- [ 17 ] 高超, 贾娅娅, 刘庆宽. 相对厚度对翼型气动特性的影响研究 [ J ]. 工程力学, 2020, 37(增刊1): 380-386.
- [ 18 ] 任旺, 李成良, 毛晓娥, 等. 基于后缘厚度变化的翼型噪声分析研究 [ J ]. 风能, 2019(4): 116-119.
- [ 19 ] MIKKELSON D C, MITCHELL G A. High speed Turboprops for Executive Aircraft - potential and recent test Results [ R ]. Houston, Texas: NASA, 1980.

---

收稿日期:2023-01-09