

文章编号:1000-8055(2022)09-1835-11

doi:10.13224/j.cnki.jasp.20210347

# 对转涵道风扇桨叶高效设计方法

郭佳豪, 周 洲, 李 旭  
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘 要:** 基于叶素动量理论的对转涵道风扇桨叶设计方法虽然设计速度快,但设计精度不高。为提高设计方法的设计精度,同时保留设计的快速性,通过 CFD 计算对基于叶素动量理论的桨叶快速设计方法进行修正,提出一种耦合 CFD 修正的对转涵道风扇桨叶高效设计方法。通过 CFD 计算与修正设计的不断迭代,可使设计结果收敛至 CFD 计算结果,得到满足设计要求的桨叶。结果表明:MRF 方法对对转涵道风扇性能的求解精度不足,需采用非定常 CFD 方法。而通过 CFD 计算结果修正桨叶的拉力占比、入流角及叶素气动力后,对转涵道风扇总拉力设计精度提高 10.4%,扭矩设计精度提高 18.2%。文中提出的高效设计方法只需进行少量的 CFD 计算修正便能较好地满足设计要求,进行加速处理后,设计效率进一步提高 25%。

**关 键 词:** 涵道风扇; 对转; 桨叶设计; 叶素动量理论; 修正设计

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

## Efficient design method for blades of counter-rotating ducted fan

GUO Jiahao, ZHOU Zhou, LI Xu

(School of Aeronautics,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The design method for the blades of a counter-rotating ducted fan based on blade element momentum theory has a fast design speed, but the design accuracy is not high. In order to improve the design accuracy and maintain the design speed, the fast design method based on blade element momentum theory was modified by CFD to propose an efficient design method for the blades of the counter-rotating ducted fan coupled with CFD modification. Through continuous iteration of the CFD calculation and modified design, the design results were converged to the CFD results, and the blades meeting the design requirements were obtained. The results showed that the MRF method was not accurate enough to solve the performance of the counter-rotating ducted fan, and the unsteady CFD method should be used. After modifying the blade thrust ratio, the inflow angle and blade aerodynamic forces through the CFD results, the design accuracy of the total thrust was improved by 10.4%, and the design accuracy of the torque was improved by 18.2%. The efficient design method used can better meet the design requirements with a small amount of CFD modifications. In addition, the design efficiency was further improved by 25% through the accelerated processing.

收稿日期: 2021-07-05

基金项目: 民机专项(MJ-2015-F-009); 陕西省自然科学基金(2019JM-044); 陕西省重点研发项目(2021ZDLGY09-08)

作者简介: 郭佳豪(1993—),男,博士生,主要从事耦合动力的飞行器气动布局设计研究。

通信作者: 周洲(1966—),女,教授、博士生导师,博士,主要从事无人机设计研究。E-mail:zhouzhou@nwpu.edu.cn

引用格式: 郭佳豪,周洲,李旭. 对转涵道风扇桨叶高效设计方法[J]. 航空动力学报,2022,37(9):1835-1845. GUO Jiahao,ZHOU Zhou,LI Xu. Efficient design method for blades of counter-rotating ducted fan[J]. Journal of Aerospace Power,2022,37(9):1835-1845.

**Key words:** ducted fan; counter-rotating; blade design;  
blade element momentum theory; modified design

涵道风扇相比孤立螺旋桨具有更高的安全性以及气动效率<sup>[1]</sup>。2013年美国国防部高级研究计划局开展了“垂直起降试验飞行器”项目,由此极光公司研制了倾转电涵道风扇的“雷击”无人机,2017年以涵道风扇为动力的“Lilium Jet”全电动垂直起降原型机完成首飞,美国空军也于2020年2月启动了“Agility Prime”电动垂直起降飞行器演示验证项目。涵道风扇作为未来垂直起降飞行器的主要动力形式,对其桨叶设计的研究具有较高的应用价值。

涵道风扇的桨叶设计通常采用叶素动量理论、升力线模型及面元法等快速方法。刘沛清<sup>[2]</sup>推导了涵道风扇叶素动量理论。高永卫等<sup>[3]</sup>提出一种涵道风扇工程设计方法。Coney<sup>[4]</sup>基于升力线模型建立了涵道风扇桨叶设计方法。Stubblefield<sup>[5]</sup>采用最优环量设计方法<sup>[6]</sup>对涵道风扇的桨叶进行了设计。Epps等<sup>[7-8]</sup>对桨叶升力线模型进行了研究,提出一种鲁棒性更高的尾涡模型,并将其应用于涵道风扇设计软件OpenProp<sup>[9]</sup>中。而基于面元法快速求解,不同学者进行了涵道风扇相关的优化设计<sup>[10-12]</sup>。

对转涵道风扇采用旋转方向相反、前后布置的两个转子,相比“转子-静子”涵道风扇桨叶结构,有着更加紧凑的结构,且效率更高<sup>[13]</sup>,可在涵道风扇尺寸及转速不变的情况下提供更大的拉力,同时可使气流通过两转子后无旋转,从而使涵道风扇总扭矩为0 N·m。Cho等<sup>[13]</sup>采用面元法对对转螺旋桨的流场进行了分析。Nouri<sup>[14]</sup>对对转涵道风扇进行了设计及试验测试。随着计算流体力学的不断发展,更高精度的CFD(computational fluid dynamics, CFD)方法被广泛应用于涵道风扇性能及流场求解中,如多重参考系法(multiple reference frame, MRF)、基于滑移网格及嵌套网格的非定常数值模拟方法等<sup>[15-18]</sup>。Ebus等<sup>[19]</sup>对对转电涵道风扇的性能进行了测试及CFD计算,表明CFD计算结果与试验结果符合较好。

基于叶素动量理论、升力线及面元法等快速方法对对转涵道风扇桨叶进行的直接设计或优化设计,虽然求解速度快,但由于方法本身求解精度不足,设计结果往往不能较好地满足设计要求。若采用精度更高的CFD求解方法进行桨叶的优

化设计,由于优化本身需要大量的CFD求解,这使得设计的效率降低。如基于应用广泛的遗传算法进行的桨叶优化,需对数量为 $n$ 的种群中的所有个体进行求解,若优化过程中种群进化 $m$ 代,则整个优化过程需进行 $n \times m$ 次计算。为提高优化效率,近些年又发展出“代理优化设计方法<sup>[20]</sup>”,其采用代理模型代替CFD进行快速求解,从而提高优化效率,而CFD计算只针对建立代理模型的初始样本点及每一次优化迭代增加的样本点进行。假设建立代理模型的初始样本点为 $n$ ,每次优化迭代采用典型的“最小化代理模型预测+最大化目标函数改善期望”加点法则,优化设计共迭代 $m$ 次,则整个设计过程也需 $n + 2m$ 次CFD求解。以文献[20]中不同算例的优化验证以及翼型和机翼的优化设计为参考,所需的CFD求解次数基本均在百次以上,设计效率也相对较低。

为使设计兼顾快速性及高精度,本文首先基于叶素动量理论建立对转涵道风扇桨叶的快速设计方法,再以CFD计算结果为参考对设计方法进行合理的修正,提出一种只需少量CFD计算便能满足设计要求的对转涵道风扇桨叶高效设计方法,并对设计方法的可行性进行了验证。

## 1 对转涵道风扇桨叶快速设计方法

### 1.1 对转涵道风扇叶素动量理论

假设对转涵道风扇桨叶总拉力为 $T_p$ ,其在对转涵道风扇总拉力 $T$ 中的占比 $a_1$ ,前转子拉力 $T_{r1}$ 在桨叶总拉力中的占比为 $a_2$ , $T_{r2}$ 为后转子拉力,则

$$T_p = T_{r1} + T_{r2} \quad (1)$$

$$a_1 = \frac{T_p}{T} \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{T_{r1}}{T_p} \quad (3)$$

前转子叶素分析如图1所示, $V_0$ 为来流速度, $\Omega_1$ 为转速, $\alpha_{r1}$ 为叶素迎角, $\beta$ 为干涉角, $\gamma$ 为阻升角, $\varphi_{r1}$ 为实际入流角, $\varphi_0$ 为几何入流角。 $W_{r1}$ 表示合速度, $V_{a1}$ 表示轴向诱导速度, $V_{t1}$ 表示切向诱导速度, $V'$ 表示几何诱导速度, $L$ 为升力, $D$ 为阻力, $F_{t1}$ 为转子的切向力。

假设前转子叶素环量产生 $\Delta\Gamma_{r1}$ 大小的扰动,使桨叶拉力和扭矩分别产生 $\Delta T_{r1}$ 和 $\Delta Q_{r1}$ 的变化,

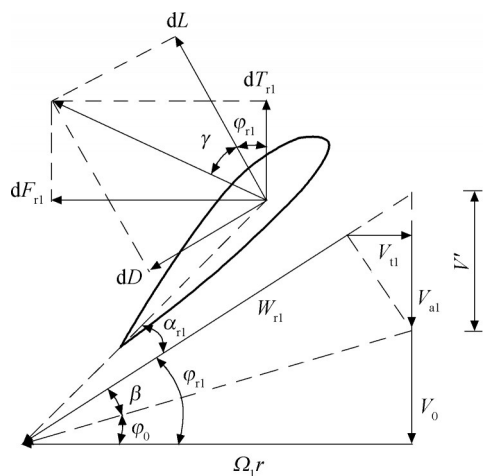


图1 前转子叶素分析图

Fig.1 Blade element analysis of the front rotor

则前转子所做的有用功与吸收能量的比值  $k$  为

$$k = \frac{V_0 \Delta T_{r1}}{\Omega_1 \Delta Q_{r1}} \quad (4)$$

不考虑阻力影响,前转子拉力、扭矩变化为

$$\Delta T_{r1} = \rho \Delta \Gamma_{r1} (\Omega_1 r - V_{t1}) dr \quad (5)$$

$$\Delta Q_{r1} = \rho \Delta \Gamma_{r1} (V_0 + V_{a1}) r dr \quad (6)$$

由图1可知

$$\tan \varphi_{r1} = \frac{V_0 + V'}{\Omega_1 r} = \frac{V' - V_{a1}}{V_{t1}} = \frac{V_0 + V_{a1}}{\Omega_1 r - V_{t1}} \quad (7)$$

则由式(4)~式(7)式可得

$$k = \frac{V_0}{\Omega_1} \cdot \frac{(\Omega_1 r - V_{t1})}{(V_0 + V_{a1}) r} = \frac{V_0}{V_0 + V'} \quad (8)$$

为使前转子效率最高,则  $k$  值的径向分布为常数<sup>[2]</sup>,此时  $V'$  的径向分布亦为常数<sup>[21]</sup>。因此可通过求解  $V'$  来确定对转涵道风扇前转子各叶素的状态,进而进行桨叶设计。

设对转涵道风扇喷流中的轴向诱导速度为  $V_{aw}$ ,根据动量理论前转子叶素的拉力和切向力为

$$dT_{r1} = 2a_1 a_2 \pi r \rho (V_0 + V_{a1}) V_{aw} dr \quad (9)$$

$$dF_{r1} = 4\pi r \rho (V_0 + V_{a1}) V_{t1} dr \quad (10)$$

气流经过对转转转子后总压增加,则前转子叶素的拉力又可表示为

$$dT_{r1} = 2a_2 \pi r \rho \left( V_0 + \frac{V_{aw}}{2} \right) V_{aw} dr \quad (11)$$

根据式(9)式及式(11)式得到前转子处及喷流中轴向诱导速度的关系

$$V_{aw} = 2(a_1 - 1)V_0 + 2a_1 V_{a1} \quad (12)$$

又根据图1可知

$$\tan(\varphi_{r1} + \gamma) = \frac{dF_{r1}}{dT_{r1}} = \frac{2V_{t1}}{a_1 a_2 V_{aw}} \quad (13)$$

根据式(12)及式(13)可得前转子各诱导速度的关系

$$V_{t1} = a_1 a_2 (a_1 - 1) V_0 \tan(\varphi_{r1} + \gamma) + a_1^2 a_2 V_{a1} \tan(\varphi_{r1} + \gamma) \quad (14)$$

则进一步得到各诱导速度同  $V'$  的关系

$$V_{a1} = \frac{V' + a_1 a_2 (1 - a_1) V_0 \tan(\varphi_{r1} + \gamma) \tan \varphi_{r1}}{1 + a_1^2 a_2 \tan(\varphi_{r1} + \gamma) \tan \varphi_{r1}} \quad (15)$$

$$V_{t1} = \frac{V' - V_{a1}}{\tan \varphi_{r1}} \quad (16)$$

设  $V_{a2}$  为后转子的轴向诱导速度、 $V_{t2}$  为后转子的切向诱导速度。忽略两转子的间距时,由于同处涵道内,两者轴向诱导速度相同。

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (17)$$

对于后转子,要抵消前转子的扭矩,则气流经过前后转子后无旋转,即后转子叶素的切向诱导速度与前转子的切向诱导速度大小相同、方向相反

$$V_{t1} = V_{t2} \quad (18)$$

根据涡流理论,切向诱导速度决定了环量的大小,以前转子为例

$$\Gamma_{r1} = \frac{4\pi r}{N_{b1}} V_{t1} \quad (19)$$

因此扭矩抵消下,前后转子叶素总环量的大小相同

$$N_{b1} \Gamma_{r1} = N_{b2} \Gamma_{r2} \quad (20)$$

故对转涵道风扇后转子的叶素状态可由前转子的叶素状态直接得到,前转子设计完成后,可直接进行后转子的桨叶设计。

## 1.2 桨叶一体化快速设计方法

设计前给出桨叶拉力占比  $a_1$  的初值,确定前转子桨叶数  $N_{b1}$  以及后转子桨叶数  $N_{b2}$ 。再根据桨叶翼型,分别给出前后转子叶素设计迎角及升阻力系数。对转涵道风扇桨叶的快速设计方法步骤如下:

- 1) 将前后转子划分为  $N$  个叶素截面。
- 2) 给出前转子拉力占比  $a_2$  的初值。
- 3) 前转子设计。

对于已知的  $V'$ ,通过式(7)、式(15)、式(16)及式(19)式得到前转子叶素的人流角、诱导速度及环量信息,叶素合速度为

$$W_{r1} = \sqrt{(\Omega_1 r - V_{t1})^2 + (V_0 + V_{a1})^2} \quad (21)$$

计算可得前转子叶素弦长

$$b_{r1} = \frac{2\Gamma_{r1}}{W_{r1} C_{l1}} \quad (22)$$

前转子叶素的拉力及扭矩分别为

$$dT_{r1} = \frac{1}{2} \rho W_{r1}^2 b_{r1} (C_{l1} \cos \varphi_{r1} - C_{d1} \sin \varphi_{r1}) dr \quad (23)$$

$$dQ_{r1} = \frac{1}{2} \rho W_{r1}^2 b_{r1} (C_{l1} \sin \varphi_{r1} + C_{d1} \cos \varphi_{r1}) r dr \quad (24)$$

对转涵道风扇的总拉力由下式得到:

$$T = \int_{R_h}^R \frac{N_{b1}}{2a_1 a_2} \rho W_{r1}^2 b_{r1} (C_{l1} \cos \varphi_{r1} - C_{d1} \sin \varphi_{r1}) dr \quad (25)$$

采用 Newton 迭代方法求解满足拉力要求的  $V'$ , 可确定前转子各叶素的状态, 根据式 (22) 可得前转子叶素的弦长, 而前转子叶素的扭转角为

$$\theta_{r1} = \varphi_{r1} + \alpha_{r1} \quad (26)$$

4) 后转子设计。

完成前转子的设计后, 可由式 (17)、式 (18) 及式 (20) 式直接得到后转子的诱导速度及环量, 后转子叶素的合速度及入流角为

$$W_{r2} = \sqrt{\Omega_{r2}^2 r^2 + (V_0 + V_{a2})^2} \quad (27)$$

$$\tan \varphi_{r2} = \frac{V_0 + V_{a2}}{\Omega_{r2} r} \quad (28)$$

根据后转子叶素的设计状态, 可直接求得后转子叶素的弦长及扭转角

$$b_{r2} = \frac{2\Gamma_{r2}}{W_{r2} C_{l2}} \quad (29)$$

$$\theta_{r2} = \varphi_{r2} + \alpha_{r2} \quad (30)$$

后转子叶素的拉力及扭矩分别为

$$dT_{r2} = \frac{1}{2} \rho W_{r2}^2 b_{r2} (C_{l2} \cos \varphi_{r2} - C_{d2} \sin \varphi_{r2}) dr \quad (31)$$

$$dQ_{r2} = \frac{1}{2} \rho W_{r2}^2 b_{r2} (C_{l2} \sin \varphi_{r2} + C_{d2} \cos \varphi_{r2}) r dr \quad (32)$$

5) 后转子弦长修正。

由于后转子直接根据前转子的设计结果设计得到, 由式 (24) 及式 (32) 式计算的前后转子扭矩的大小不能完全保证一致, 因此这里对后转子的弦长进行修正, 以保证前后转子的扭矩完全抵消。

$$b_{r2} = \frac{b_{r1} \cdot Q_{r1}}{Q_{r2}} \quad (33)$$

6) 求解前转子拉力占比。

根据式 (3)~式 (5), 可得初值  $a_2$  对应的对转涵道风扇设计下的总拉力

$$T' = \frac{T_{r1} + T_{r2}}{a_1} \quad (34)$$

迭代求解  $a_2$ , 使  $T'$  与设计要求的总拉力  $T$  相同, 从而确定最终的前转子拉力占比  $a_2$ , 与之对应的前后转子设计结果即为所需的设计结果。

## 2 数值模拟方法验证

采用数值模拟方法对涵道风扇的设计结果进行评价。首先验证数值模拟方法的可行性。对一种用于垂直起降飞行器的涵道风扇的性能进行测试, 涵道截面如图 2 所示, 采用扁平化设计, 以减小平飞时的阻力。涵道长  $l = 0.100$  m, 涵道内壁半径  $R = 0.200$  m, 桨毂半径  $R_h = 0.050$  m, 涵道外壁最大半径  $R_{\max} = 0.320$  m。该涵道风扇由 12 片桨叶的转子及 8 片桨叶的静子组成, 桨尖间隙为 2 mm, 如图 3 所示。测试状态为悬停状态。

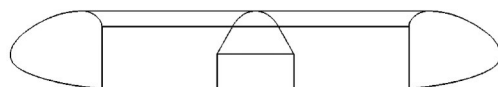


图 2 测试涵道风扇的涵道截面示意图

Fig.2 Schematic diagram of the duct section for the testing ducted fan

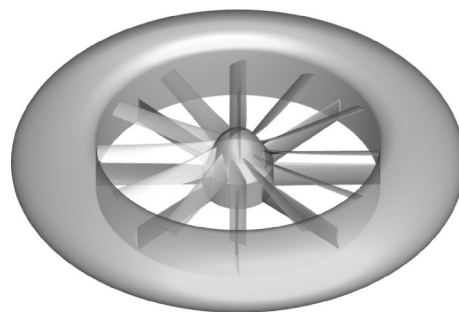


图 3 测试涵道风扇的几何

Fig.3 Geometry of the testing duct fan

测试现场及各仪器的连接方式如图 4 所示。采用 ATI Delta 六分量传感器测量涵道风扇的气动力, 使用 Eagle Tree 转速传感器进行转速测量, 并由稳压电源供电, 由电调将直流电转换为交流电。

同时采用求解雷诺平均 N-S (Navier-Stokes) 方程的 MRF 方法及基于滑移网格的非定常数值模拟两种 CFD 方法对涵道风扇的性能进行计算, 湍流模型采用  $k-\omega$  SST (shear stress transfer) 模型。非定常计算的时间步长取  $t = 3.030\ 303 \times 10^{-5}$  s, 计算稳定后, 取一个旋转周期的气动力结果, 求其均值得到非定常时均结果。试验测试结果与计算结果的对比如图 5 所示, 图中 EXP 表



图 4 涵道风扇试验照片及连接方式  
Fig.4 Experimental picture and connection mode of the ducted fan

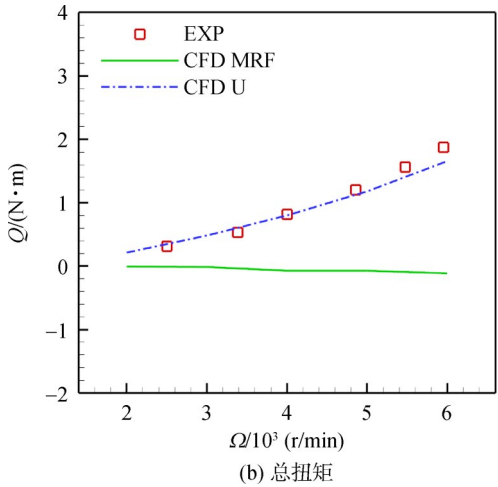
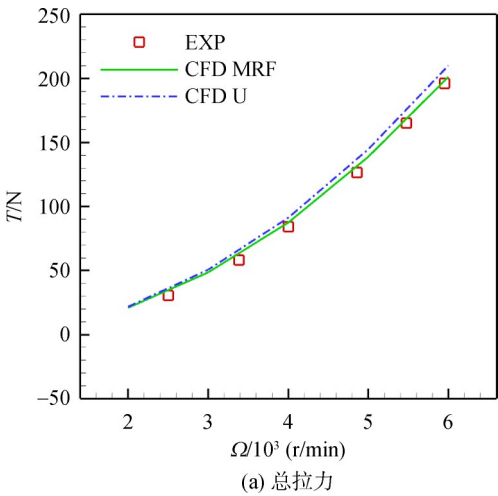


图 5 不同计算结果与试验结果对比  
Fig.5 Comparison of the results between calculation and experiment

示测试结果,CFD MRF 表示 MRF 计算结果,CFD U 代表非定常计算结果, $\Omega$ 表示设计转速。非定常计算得到的涵道风扇总拉力  $T$  及总扭矩均  $Q$  与测试结果符合较好,虽然总拉力的计算精度

不及 MRF 方法,但在总扭矩的计算上明显更优。因此采用基于滑移网格的非定常数值模拟方法对设计进行校验。

3 对转涵道风扇桨叶设计验证

3.1 设计目标

对图 6 所示的对转涵道风扇的前后转子进行设计。涵道总长  $l=0.4235\text{ m}$ ,涵道内壁半径  $R=0.300\text{ m}$ ,涵道外壁最大半径  $R_{\text{max}}=0.3645\text{ m}$ ,桨毂半径  $R_h=0.050\text{ m}$ 。设计高度  $H=0\text{ km}$ ,设计拉力  $T=900\text{ N}$ ,设计转速  $\Omega=4\,500\text{ r/min}$ ,设计状态为悬停状态。前转子桨叶数目  $N_{b1}=8$ ,后转子桨叶数目  $N_{b2}=8$ ,桨尖间隙为  $2\text{ mm}$ ,桨叶拉力占比初始值取  $a_1=0.500$ 。

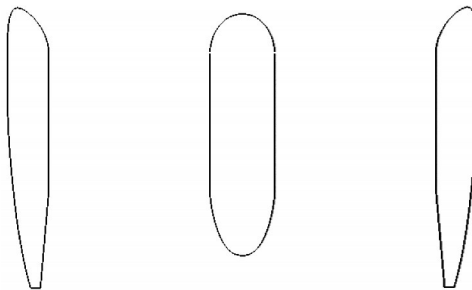


图 6 对转涵道风扇的涵道外形截面示意图  
Fig.6 Schematic diagram of the duct section for the counter-rotating duct fan

采用如图 7 所示翼型设计桨叶,翼型弯度一致,厚度由桨根至桨尖线性减小,前后转子的叶素设计状态相同。前转子的叶素设计状态为  $\alpha_{r1}=1^\circ$ 、 $C_{l1}=0.500$ 、 $C_{d1}=0.020$ 。

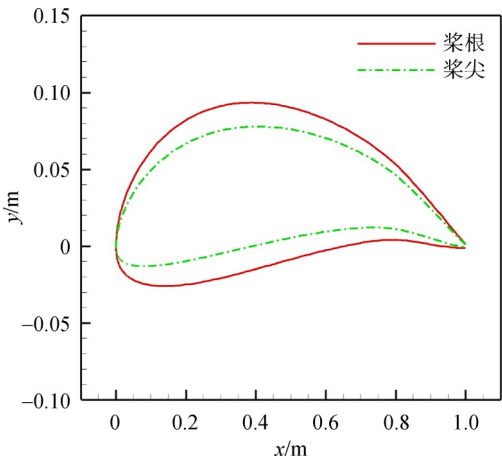


图 7 对转涵道风扇桨叶翼型  
Fig.7 Airfoils of the blades of the counter-rotating ducted fan

### 3.2 设计结果

对转涵道风扇初始设计的前后转子弦长  $b$  及扭转角  $\theta$  如图 8 所示。

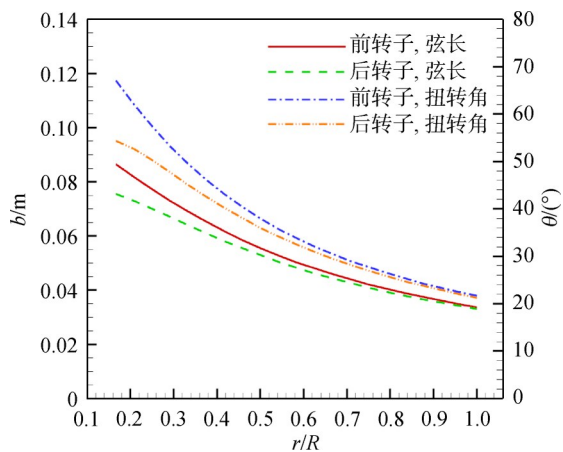


图 8 对转涵道风扇初始设计结果

Fig.8 Initial design results of the counter-rotating duct fan

分别采用 MRF 方法以及基于滑移网格的非定常数值模拟计算涵道风扇性能,湍流模型采用  $k-\omega$  SST 模型。由于 MRF 方法采用旋转坐标系而非旋转桨叶的方法进行数值模拟,因此不同的前后转子相对位置可能得到不同的计算结果。MRF 方法计算时采用如图 9 所示的两种不同相对位置(MRF 0、MRF 1)。而非定常计算中桨叶则模拟真实的物理转动,因此不同的前后转子相对位置不影响计算的时均结果。非定常计算时间步长取  $t = 7.407\ 407 \times 10^{-5}$  s。

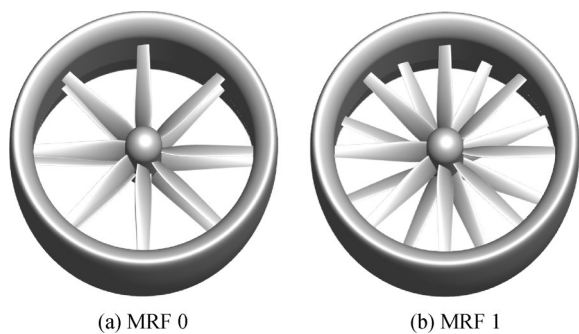


图 9 不同的前后转子相对位置

Fig.9 Different relative positions of front and rear rotors

表 1 展示了设计结果与不同 CFD 计算结果,以非定常计算结果为参考,对比可知基于叶素动量理论快速设计方法设计的桨叶不能满足设计要求,总拉力偏差为 10.4%,扭矩偏差为 18.2%,不能相互抵消。而不同的前后转子的相对位置对应的 MRF 计算结果间存在差异,且无法与非定

常计算结果完全符合,故 MRF 方法不能作为对转涵道风扇性能评价的高精度方法。

表 1 对转涵道风扇性能对比

Table 1 Performance comparison of the counter-rotating ducted fan

| 参数                   | 设计      | MRF 0   | MRF 1   | CFD U   |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| $T_{r1}/N$           | 218.787 | 167.519 | 173.396 | 163.939 |
| $Q_{r1}/(N \cdot m)$ | 27.235  | 21.939  | 23.079  | 22.068  |
| $T_{r2}/N$           | 231.069 | 215.509 | 203.706 | 211.173 |
| $Q_{r2}/(N \cdot m)$ | 27.235  | 25.699  | 25.019  | 26.015  |
| $T/N$                | 900.000 | 773.303 | 804.781 | 805.995 |

## 4 设计方法修正

为提高基于叶素动量理论的对转涵道风扇桨叶快速设计方法的设计精度,对设计方法进行修正。

### 4.1 桨叶拉力占比修正

设计前给定的桨叶拉力占比  $a_1$  的初始值不能保证与真实值一致, $a_1$  的偏差会影响设计的精度,因此需对其进行修正。可通过 CFD 计算结果对  $a_1$  进行更新。

### 4.2 转子入流角修正

忽略阻力下通过式(23)与式(24)式可知

$$\frac{Q_{r1}}{T_{r1}} = r \tan \varphi_{r1} \quad (35)$$

前转子的拉力与扭矩实际反映了前转子的入流角信息。因此可通过修正  $V'$  对前转子叶素入流角进行合理的修正,以提高转子桨叶设计精度。

同理,后转子的拉力与扭矩也反映了后转子的入流角信息,由于设计保证对前后转子扭矩抵消,即切向诱导速度抵消,因此通过修正轴向速度  $V_{a2}$  来修正后转子的入流角。

### 4.3 转子气动力修正

设计给出的叶素设计迎角对应的升阻力系数不能保证与真实状态相同,两者间的偏差在忽略阻力影响下体现为迎角与升力系数的不匹配。因此通过修正  $\alpha_{r1}$  及  $\alpha_{r2}$  对前后转子的叶素气动力进行修正。

此外,为保证前后转子扭矩完全抵消,参考式(29),还需通过修正后转子叶素设计升力系数  $C_{l2}$  对后转子的弦长进行修正。

#### 4.4 快速修正设计方法步骤

对转涵道风扇桨叶快速修正设计方法的设计步骤与文中第1.2节“桨叶一体化快速设计方法”基本一致。不同点在于设计前需给出修正参数  $V_{xz1}$  及  $V_{xz2}$ , 而后在前后转子设计中增加相关的修正处理。

##### 1) 前转子修正设计

设计具体步骤同文中第1.2节的前转子设计, 只是在设计前转子的弦长后, 通过式(36)计算得到修正后的  $\varphi_{r1}$ , 再计算前转子的气动力, 进行余下的设计步骤。

$$\varphi_{r1} = \arctan\left(\frac{V_0 + V' \cdot V_{xz1}}{\Omega_1 r}\right) \quad (36)$$

##### 2) 后转子修正设计

计算后转子的诱导速度及环量后, 通过下式修正轴向诱导速度:

$$V_{a2} = V_{a2} \cdot V_{xz2} \quad (37)$$

之后通过式(28)计算得到修正后的  $\varphi_{r2}$ , 其余设计步骤不变。

#### 4.5 修正参数求解步骤

对转涵道风扇桨叶设计的修正参数求解的主要思想是: 根据已知的桨叶几何, 构建满足CFD计算结果的叶素状态, 从而反解得到合理的修正参数。具体步骤如下:

1) 根据CFD计算得到的  $T$ 、 $T_{r1}$ 、 $Q_{r1}$ 、 $T_{r2}$  及  $Q_{r2}$ , 由式(1)及式(2)更新桨叶拉力占比  $a_1$ 。

2) 给出  $V_{xz1}$  的迭代初值, 以CFD计算的总拉力  $T$  为设计目标, 采用文中第4.4节快速修正设计方法进行前转子设计, 得到修正设计的  $T_{r1-xz}$  及  $Q_{r1-xz}$ 。

3) 根据步骤2)迭代求解  $V_{xz1}$ , 直至得到的  $Q_{r1-xz}/T_{r1-xz}$  与CFD计算的  $Q_{r1-CFD}/T_{r1-CFD}$  比值相同, 从而得到前转子入流角修正参数  $V_{xz1}$  及修正后的入流角。

4) 已知CFD求解的对转涵道风扇的前转子扭转角, 根据修正后的入流角由式(26)反解叶素迎角  $\alpha_{ri}$ , 再求其均值得到修正的前转子叶素设计迎角  $\alpha_{r1}$

$$\alpha_{r1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{ri} \quad (38)$$

5) 后转子修正参数求解方法同前转子。首先给出  $V_{xz2}$  的迭代初值, 根据前转子的修正设计结果设计后转子。迭代求解  $V_{xz2}$  直至设计结果满足  $Q_{r2-CFD}/T_{r2-CFD}$  的比值, 得到后转子入流角修正

参数  $V_{xz2}$  及修正后的入流角。再由式(30)反解后转子叶素迎角并求均值, 得到修正的  $\alpha_{r2}$ 。

6) 最后对后转子叶素设计升力系数  $C_{l2}$  进行修正, 以保证前后转子扭矩的对消。

$$C_{l2} = C_{l2} \cdot Q_{r2-CFD}/Q_{r2-xz} \quad (39)$$

## 5 对转涵道风扇桨叶高效设计方法

### 5.1 方法简述

耦合CFD修正的对转涵道风扇桨叶高效设计方法的步骤如下:

1) 令  $V_{xz1} = 1$  及  $V_{xz2} = 1$ , 根据前后转子叶素的初始设计气动力及设计状态, 采用快速修正设计方法进行设计, 得到对转涵道风扇桨叶初始几何信息。

2) 通过CFD计算得到对转涵道风扇气动力信息  $T$ 、 $T_{r1}$ 、 $Q_{r1}$ 、 $T_{r2}$  及  $Q_{r2}$ 。

3) 根据CFD计算结果采用修正参数求解方法更新  $a_1$ 、 $V_{xz1}$ 、 $\alpha_{r1}$ 、 $V_{xz2}$ 、 $\alpha_{r2}$  及  $C_{l2}$ 。

4) 根据更新的修正参数采用快速修正设计方法重新设计桨叶。

5) 重复步骤2)~步骤4), 直至满足设计要求。设计流程如图10所示。

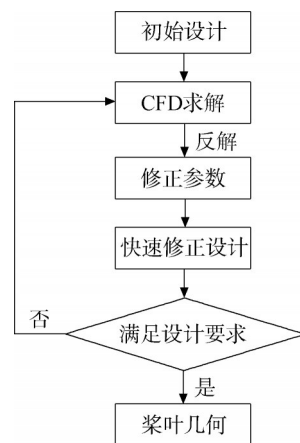


图10 耦合CFD修正的桨叶高效设计流程

Fig.10 Efficient design process of the blades coupled with CFD modification

### 5.2 设计方法验证

采用上述耦合CFD修正的高效设计方法对对转涵道风扇的桨叶进行设计, 结果如表2所示。随着修正设计的不断迭代, 设计结果逐渐收敛至CFD计算结果。4次修正设计后, 设计与计算得到的前后转子拉力及扭矩基本一致, 满足设计要求的同时, 前后转子的扭矩也基本抵消。设计结

果如图 11 所示,转速相同下,后转子相比于前转子增加了切向入流速度,因此后转子入流角较小,而合速度较大,由此设计的后转子的扭转角和弦长均小于前转子。最终设计的涵道风扇几何如图 12 所示。

表 2 对转涵道风扇修正设计性能对比  
Table 2 Performance comparison of the counter-rotating ducted fan after modification design

| 参数                  | 修正 1    |         | 修正 2    |         | 修正 3    |         | 修正 4    |         |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                     | 设计      | CFD U   | 设计      | CFD U   | 设计      | CFD U   | 设计      | CFD U   |
| $T_{r1}/N$          | 197.736 | 186.298 | 199.886 | 196.373 | 199.003 | 197.482 | 199.880 | 200.188 |
| $Q_{r1}/(N\cdot m)$ | 28.395  | 25.359  | 28.326  | 27.518  | 28.017  | 27.736  | 28.206  | 28.208  |
| $T_{r2}/N$          | 221.192 | 207.125 | 223.720 | 220.743 | 222.614 | 221.474 | 223.677 | 222.103 |
| $Q_{r2}/(N\cdot m)$ | 28.395  | 25.295  | 28.326  | 27.672  | 28.017  | 27.816  | 28.206  | 28.021  |
| $T/N$               | 900.000 | 836.225 | 900.000 | 891.686 | 900.000 | 891.432 | 900.000 | 899.119 |

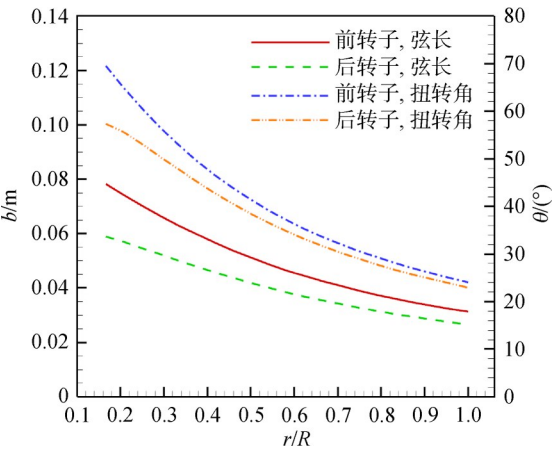


图 11 对转涵道风扇桨叶弦长与扭转角设计结果  
Fig.11 Results of the chord length and torsion angle of the blade of the counter-rotating ducted fan

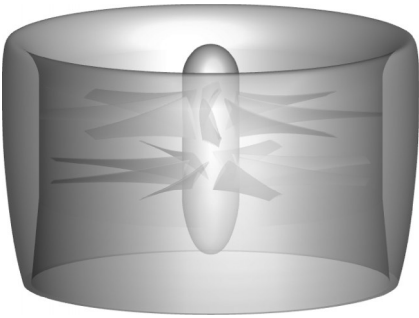


图 12 对转涵道风扇最终几何  
Fig.12 Final geometry of the counter-rotating ducted fan

6 加速设计

6.1 加速方法

4 次修正设计对应的修正参数见表 3。可以看出,经过 2 次修正设计, $\alpha_1$ 、 $V_{xz1}$ 、 $V_{xz2}$  及  $C_{l2}$  已经

表 3 对转涵道风扇设计修正参数  
Table 3 Design modification parameters of the counter-rotating ducted fan

| 参数                       | 修正 1   | 修正 2  | 修正 3  | 修正 4  |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|
| $a_1$                    | 0.465  | 0.470 | 0.468 | 0.470 |
| $V_{xz1}$                | 1.104  | 1.096 | 1.088 | 1.092 |
| $\alpha_{r1}/(^{\circ})$ | -1.011 | 0.387 | 0.701 | 0.786 |
| $V_{xz2}$                | 1.052  | 1.044 | 1.037 | 1.041 |
| $\alpha_{r2}/(^{\circ})$ | -0.493 | 0.746 | 0.992 | 1.053 |
| $C_{l2}$                 | 0.589  | 0.588 | 0.591 | 0.593 |

接近收敛,之后的修正主要使  $\alpha_{r1}$  及  $\alpha_{r2}$  收敛。因此若能加速  $\alpha_{r1}$  及  $\alpha_{r2}$  的收敛,则能进一步提高设计效率。

结合表 2 可知,设计未收敛时  $\alpha_{r1}$  及  $\alpha_{r2}$  偏小,因此设计得到的前后转子扭转角偏小,致使对转涵道风扇的桨叶拉力不足。因此可利用桨叶拉力的偏差加速叶素迎角的收敛。加速方式如下, $T$  为设计要求的拉力, $T_{r1-CFD}$  及  $T_{r2-CFD}$  为 CFD 计算得到的前后转子的拉力, $a_1$  及  $a_2$  为 CFD 更新的结果。

$$\alpha_{r1} = \alpha_{r1} + \left(1 - \frac{T_{r1-CFD}}{a_1 a_2 T}\right) \frac{C_{l1}}{2\pi} \tag{40}$$

$$\alpha_{r2} = \alpha_{r2} + \left[1 - \frac{T_{r2-CFD}}{a_1 (1 - a_2) T}\right] \frac{C_{l2}}{2\pi} \tag{41}$$

由式(40)、式(41)可知,当 CFD 计算得到的桨叶拉力小于设计要求时,叶素设计迎角增加,设计的桨叶扭转角增大,反之,设计的桨叶扭转角减小。由此可使设计结果更快地趋于 CFD 计算结

果。加速处理在反解修正参数之后进行。

6.2 加速方法验证

采用加速的桨叶高效设计方法重新设计对转涵道风扇的桨叶,修正参数及涵道风扇性能如表 4 及表 5 所示。

加速后,经过 3 次修正设计,设计精度已接近未加速时的 4 次修正设计,对应的涵道风扇桨叶几何也基本一致,如图 13 所示。验证了加速方法的可行性。

相比基于叶素动量理论的快速设计方法,本文提出的耦合 CFD 修正的高效设计方法设计精度大幅度提高,而付出的代价是额外的 3 次 CFD 计算。但实际上基于叶素动量理论的快速设计要想满足设计要求,需要不断地试错调整,且每一次调整都需要进行 CFD 计算进行验证,从这点上看文中提出的高效设计方法进行了更合理的调整,所需 CFD 计算验证的次数更少,并没有额外的代价。而基于 CFD 求解的桨叶优化设计需要大量

的 CFD 计算,以文中的对转涵道风扇计算为例,一次非定常 CFD 计算耗时 20 h 左右,即使采用代理优化方法进行对转涵道风扇桨叶的设计,设计耗时也基本是无法接受的,但本文的高效设计方法只需少量的非定常 CFD 计算,比之更加高效实用。

表 4 对转涵道风扇加速设计下修正参数变化  
Table 4 Variation of modification parameters of the counter-rotating ducted fan under accelerated design

| 参数                       | 修正 1   | 修正 2  | 修正 3  |
|--------------------------|--------|-------|-------|
| $a_1$                    | 0.465  | 0.466 | 0.468 |
| $V_{x21}$                | 1.104  | 1.087 | 1.090 |
| $\alpha_{r1}/(^{\circ})$ | -0.538 | 0.632 | 0.759 |
| $V_{x22}$                | 1.052  | 1.034 | 1.038 |
| $\alpha_{r2}/(^{\circ})$ | 0.064  | 1.171 | 1.237 |
| $C_{12}$                 | 0.589  | 0.605 | 0.609 |

表 5 对转涵道风扇加速设计下性能对比  
Table 5 Performance comparison of the counter-rotating ducted fan under accelerated design

| 参数                  | 修正 1    |         | 修正 2    |         | 修正 3    |         |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                     | 设计      | CFD U   | 设计      | CFD U   | 设计      | CFD U   |
| $T_{r1}/N$          | 197.736 | 188.521 | 197.653 | 194.572 | 199.468 | 200.136 |
| $Q_{r1}/(N\cdot m)$ | 28.395  | 26.057  | 27.851  | 27.336  | 28.006  | 28.175  |
| $T_{r2}/N$          | 221.192 | 216.579 | 221.854 | 223.586 | 222.199 | 221.670 |
| $Q_{r2}/(N\cdot m)$ | 28.395  | 26.786  | 27.851  | 28.032  | 28.006  | 27.975  |
| $T/N$               | 900.000 | 868.816 | 900.000 | 894.145 | 900.000 | 901.625 |

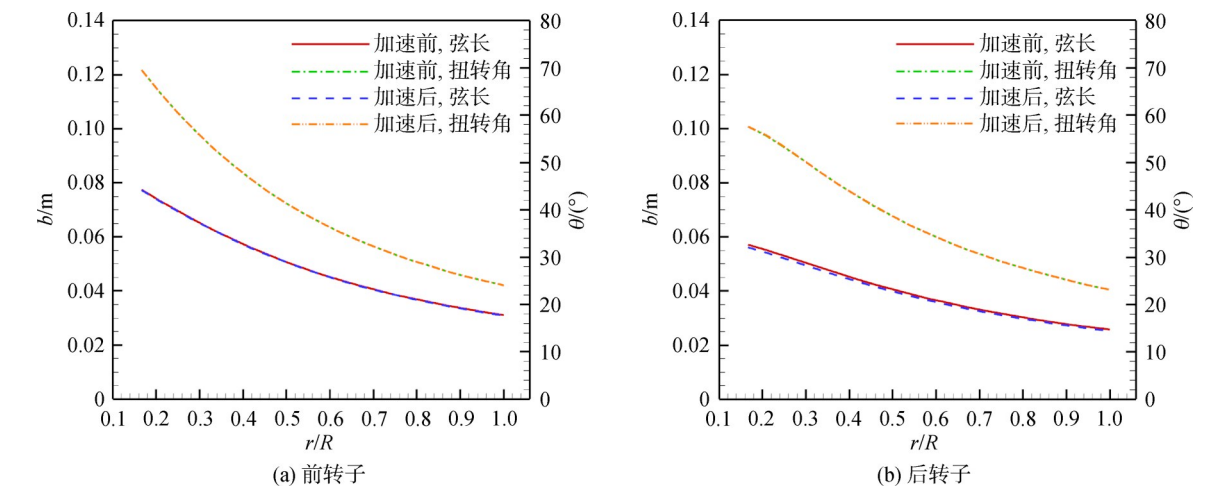


图 13 加速前后桨叶弦长与扭转角设计结果

Fig.13 Results of the chord length and torsion angle of the blade before and after accelerated design

## 7 结 论

本文建立了基于叶素动量理论的对转涵道风扇桨叶快速设计方法,并通过CFD计算对设计进行修正,提出了一种对转涵道风扇桨叶高效设计方法,并对设计进行了加速处理。得到的结论如下:

1) 基于叶素动量理论的对转涵道风扇桨叶快速设计方法,设计前需给出准确的桨叶叶素气动力及桨叶拉力占比,否则设计结果不能较好地满足设计要求。

2) 对转涵道风扇中两转子的相对位置变化影响MRF求解的对转涵道风扇的性能,而基于滑移网格的非定常数值模拟方法对涵道风扇拉力及扭矩的求解均有较好的精度,可作为涵道风扇求解的通用高精度方法。

3) 通过修正桨叶的拉力占比、入流角及叶素气动力,可提高基于叶素动量理论的桨叶快速设计方法的设计精度,而桨叶的修正参数可通过CFD计算结果反解得到。通过CFD计算及修正设计的不断迭代,可使设计结果收敛于CFD计算结果,同时满足设计要求。故确保CFD的求解精度,则能保证文中桨叶高效设计方法的设计精度。

4) 对转涵道风扇的桨叶设计表明,文中建立的桨叶高效设计方法只需进行少量的CFD计算修正便能得到满足设计要求的结果。此外,在迭代设计中通过设计与计算的拉力差对叶素迎角的收敛进行加速,可减少修正设计的步数,设计效率进一步提高25%。

5) 修正设计通过CFD计算更新修正参数,对桨叶拉力占比及叶素气动力的初始精度要求不高,故文中建立的桨叶高效设计方法具有较好的鲁棒性和适应性。

## 参考文献:

- [1] 许和勇,叶正寅.涵道螺旋桨与孤立螺旋桨气动特性的数值模拟对比[J].航空动力学报,2011,26(12):2820-2825.  
XU Heyong, YE Zhengyin. Numerical simulation and comparison of aerodynamic characteristics between ducted and isolated propellers[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12):2820-2825. (in Chinese)
- [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] 高永卫,黄灿金,魏闯.一种涵道螺旋桨的简便设计方法[J].航空工程进展,2013,4(3):352-357.  
GAO Yongwei, HUANG Canjin, WEI Chuang. A simple approach to the design of ducted propeller[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(3):352-357. (in Chinese)
- [4] CONEY W B. A method for the design of a class of optimum marine propulsors[D]. Cambridge, US: Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [5] STUBBLEFIELD J M. Numerically-based ducted propeller design using vortex lattice lifting line theory[D]. Cambridge, US: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [6] KERWIN J E, CONEY W B, HSIN C Y. Optimum circulation distributions for single and multi-component propulsors[R]. Washington: the 21st American Towing Tank Conference, 1986.
- [7] EPPS B, KIMBALL R W. Unified rotor lifting line theory[J]. Journal of Ship Research, 2013, 57(4):181-201.
- [8] EPPS B. On the rotor lifting line wake model[J]. Journal of Ship Production and Design, 2017, 33(1):31-45.
- [9] EPPS B, CHALFANT J, KIMBALL R, et al. OpenProp: an open-source parametric design and analysis tool for propellers[R]. Istanbul, Turkey: Grand Challenges in Modeling and Simulation Conference, 2009.
- [10] YANG Z Y, MA Y, CHEN Y X. Integrated optimal design of ducted propeller based on DOE[J]. Advanced Materials Research, 2011, 291/292/293/294:1698-1703.
- [11] 余龙, DRUKENBROD M, GREVE M, 等. 基于CFD技术的导管螺旋桨自动优化设计技术研究[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(4):438-444.  
YU Long, DRUKENBROD M, GREVE M, et al. Research on automatic optimization of ducted propeller design based on CFD techniques[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(4):438-444. (in Chinese)
- [12] 王海童,王掩刚,周芳,等.基于面元法的分布式涵道推进系统进气道优化设计[EB/OL]. [2021-06-28]. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.200813>.
- [13] CHO J, WILLIAMS M H. Counter-rotating propeller analysis using a frequency domain panel method[J]. Journal of Propulsion and Power, 1990, 6(4):426-433.
- [14] NOURI H, RAVELET F, BAKIR F, et al. Design and experimental validation of a ducted counter-rotating axial-flow fans system[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(10):104504.1-104504.6.
- [15] 范中允,周洲,祝小平,等.翼上螺旋桨构型耦合气动特性及翼型优化设计[J].航空学报,2019,40(8):78-92.  
FAN Zhongyun, ZHOU Zhou, ZHU Xiaoping, et al. Coupled aerodynamic analysis and airfoil optimization design for over-wing propeller configuration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(8):78-92. (in Chinese)
- [16] ECHAVARRIA C, POROSEVA S. Computational analysis of the blade number effect on the performance of a ducted propeller[R]. AIAA-2015-0016, 2015.
- [17] 史文博,李杰.对转螺旋桨流场气动干扰数值模拟[J].航空动力学报,2019,34(4):829-837.  
SHI Wenbo, LI Jie. Numerical simulation of contra-rotating

propeller flowfield aerodynamic interactions. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4):829-837. (in Chinese)

[18] 王靖元,单鹏,周亦成.浸入式贴体网格边界方法的对转桨扇非定常流动数值模拟[J].航空动力学报,2021,36(5):1060-1071.

WANG Jingyuan, SHAN Peng, ZHOU Yicheng. Unsteady flow simulation of contra-rotating propfans using immersed body-fitted grids boundary method[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(5):1060-1071. (in Chinese)

[19] EBUS T, DIETZ M, HUPFER A. Experimental and numerical studies on small contra-rotating electrical ducted fan engines[EB/OL]. [2021-06-28]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13272-021-00517-7>.

[20] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11):3197-3225.

HAN Zhonghua. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197 - 3225. (in Chinese)

[21] 郭佳豪,周洲,李旭.一种涵道螺旋桨桨叶高效设计方法[EB/OL]. [2021-06-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210218.1801.004.html>.

(编辑:王碧珺)