

横流风扇内部涡结构演化特性研究

鞠佳原, 高磊*

四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月21日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年9月30日

摘要

为了实现机翼的增升减阻, 提高飞行器效率, 在传统飞行器机翼后缘嵌入横流风扇, 横流风扇通过加速低动量流体将其从后缘排出以获得极高的升力和推力。横流风扇叶片的个数和转速会影响气流流量、总压比、总效率等流场参数, 不同参数设计的算例涡结构位置和速度、压力分布有所差异, 风扇的整体性能跟这些流场数据具有很强相关性。本文针对不同叶片数和转速的横流风扇模型进行了数值模拟研究。研究结果表明, 在本文所选的风扇叶片数范围内, 18片叶片布局的横流风扇相对其他叶片数的横流风扇具备更高的质量流量系数、总压比和流量系数, 因此有最高总效率。另一方面, 风扇转速的增加会使所有叶片数工况的总压比均得到提升。叶片数18和24的算例在增大转速过程中流量系数也随之提升。除了叶片数最少的情况, 风扇的总效率随转速的增加而增加, 但是在转速超过3000 rpm时不会再有进一步增加。

关键词

横流风扇, 数值模拟, 偏心涡, 总压比, 总效率

On the Evolution Characteristics of Internal Vortical Structure of the Cross-Flow Fan

Jiayuan Ju, Lei Gao*

School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Received: August 21, 2025; accepted: September 22, 2025; published: September 30, 2025

Abstract

In order to achieve wing lift and drag reduction, and improve aircraft efficiency, a cross-flow fan is embedded at the trailing edge of a traditional aircraft wing. The cross-flow fan accelerates low-

*通讯作者。

momentum fluid and exhausts it from the trailing edge to obtain extremely high lift and thrust. The number and speed of blades in a cross-flow fan can affect flow field parameters such as airflow rate, total pressure ratio, and total efficiency. The position, velocity, and pressure distribution of vortex structures in different parameter designs vary, and the overall performance of the fan is strongly correlated with these flow field data. This article conducts numerical simulation research on cross-flow fan models with different blade numbers and speeds. The research results indicate that within the selected range of fan blade numbers in this article, the cross-flow fan with 18 blade layout has a higher mass flow coefficient, total pressure ratio, and flow coefficient compared to cross-flow fans with other blade numbers, thus having the highest overall efficiency. On the other hand, an increase in fan speed will result in an increase in the total pressure ratio for all blade count conditions. The flow coefficient of the cases with 18 and 24 blades also increases as the speed increases. Except for the case with the minimum number of blades, the overall efficiency of the fan increases with the increase in speed, but there will be no further increase when the speed exceeds 3000 rpm.

Keywords

Cross-Flow Fan, Numerical Simulation, Eccentric Vortex, Total Pressure, Total Efficiency

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着航空电动化的发展，分布式推进技术正逐渐成为未来航空动力的重要方向[1][2]。相较传统动力推进系统，分布式电推进能够显著优化飞机的气动布局，提高等效涵道比，降低油耗、噪声及排放。然而，当前分布式推进系统设计大多采用传统的轴流式风扇作为主要的动力来源[3] (如，NASA 的 X-57 验证机)。当轴流风扇应用于边界层吸入(Boundary Layer Ingestion, BLI)的推进系统时，风扇性能由于机翼和机身表面的边界层内非均匀来流的不利影响，使其无法达到预期的工作设计要求，降低推进效率，在一定程度上抵消了分布式推进系统的优势。与传统的轴流风扇不同，横流风扇(Cross-Flow Fan, CFF)因其几何特征具有对进气口气流畸变不敏感的特性，适用于能吸入机翼表面的非均匀低速边界层，对其做功后在机翼后缘高速排出，可消除气流分离现象，减少由壁面粘性引起的尾迹速度亏损，从而提高升力系数和推进效率[4]。

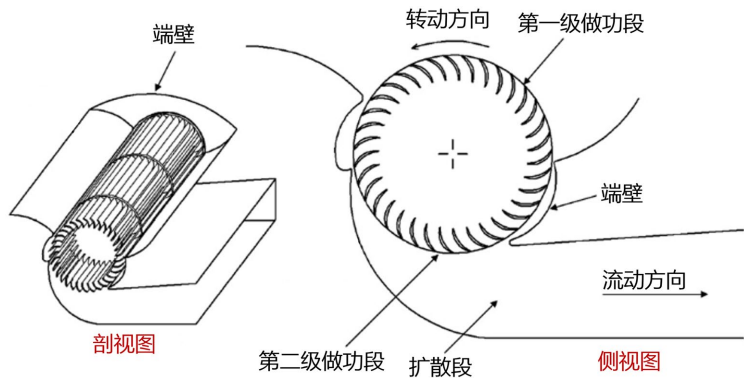


Figure 1. Schematic of the classical cross-flow fans configuration [7]
图 1. 典型横流风扇结构布局示意图[7]

为了横流风扇能更好地应用于航空领域, 研究横流风扇性能随设计参数的变化规律具有重要意义。横流风扇的设计参数对其效率和性能有决定性的影响。横流风扇由带有前弯叶片的旋转叶轮和外围环绕的外壳组成的一种涡轮机械, 如图 1 所示。横流风扇因其具有大风量、高压系数和尺寸紧凑等特点, 被广泛应用于空调机、通风循环装置等领域[5][6]。另外, 近年来横流风扇在航空领域的应用也受到了关注[7]-[10]。横流风扇在机翼中通常有两种布局形式, 即扇翼飞行器布局与嵌入式横流风扇翼型, 见图 2(a) 和图 2(b)。研究表明嵌入翼型的横流风扇布局可提供显著的升力增益并产生部分飞机推进力, 其作为分布式推进系统的一种动力装置可在一定程度上提高飞行器推进效率。除了提供推力和减小阻力, 横流风扇还可以通过吹吸作用对绕机翼流场进行环量控制, 提高飞行器在大迎角条件下气动性能与短距起降能力。这种设计不仅提升了飞行器性能, 也为航空飞行器动力系统的发展带来了新的技术革新方向。

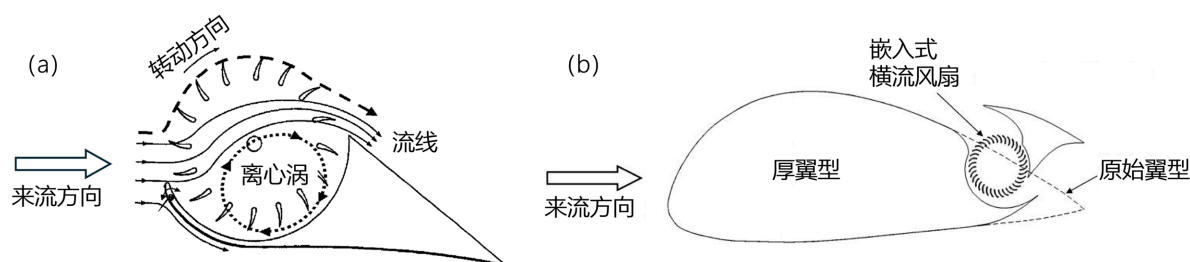


Figure 2. (a) Fan-wing configuration [11] and (b) Embedded cross-flow fan airfoil configuration [4]

图 2. (a) 扇翼飞行器布局[11]与(b) 嵌入式横流风扇翼型布局[4]

然而, 横流风扇的几何形状较为复杂, 其内部流动结构通常难以分析[12]。偏心涡是叶片脱落涡在风扇内部合并形成的一种涡结构, 其位置和强度与横流风机的性能密切相关。根据其内部流动特征, 横流风扇可视为两次做功的二级风扇, 如图 1 所示。前人大多将横流风扇嵌入翼型进行整个系统的研究。但是, 机翼周围流场结构复杂, 对横流风扇有很大影响。所以, 本研究不把横流风扇嵌入翼型综合考虑, 而是将横流风扇放入基线外壳单独分析, 通过寻找它的性能随设计参数的变化规律, 得出提高风扇性能的方法, 为以后横流风扇能更好地在翼型中应用做准备工作。对横流风扇内部流动结构机理的研究是设计高性能横流风扇的关键, 横流风扇的叶片个数和转速会对风扇的气流流量、总压比和总效率等产生影响, 不同的参数也会导致涡结构所占的位置和大小不同, 速度和压力分布不同, 进而影响风扇的性能。本文以二维嵌入式横流风扇翼型为模型, 通过数值模拟的方法来研究叶片个数和转速对横流风扇内部流动结构演化与气流驱动能力的影响规律与物理机理。

2. 物理模型与计算方法

因传统的应用于空调和通风系统的横流风扇流道使气流发生约 90° 的偏折, 并不适用于航空飞行器的推进与流动控制等应用。因此, 本文所研究的横流风扇主要基于 Kummer 和 Dang 所提出的设计(见文献 [4]中图 2), 气流入口与出口方向大致平行, 可视为嵌入型推进翼型驱动风扇的简化模型。由于横流风扇结构的展向一致性, 其流场可很好地近似为二维流动。因此, 本文主要通过二维、非定常数值模拟方法, 对横流风扇内部流动结构演化, 以及风扇叶片对气流做功过程受风扇几何与运行参数变化的影响规律进行研究。

横流风扇模型与计算域几何特征如图 3 所示。流动以风扇叶片外径 $D_o = 0.3\text{m}$ 为特征长度尺度, 流场入口高度为 0.6m , 出口高度为 0.176m , 叶片内径 $D_i = 0.19\text{m}$, 因此, 叶片内外直径比为 $D_i/D_o = 63.3\%$ 。坐标系以横流风扇转动中心为原点 O , 水平方向为 x 方向, 垂直方向为 y 方向。如图 3 所示, 横流风扇

采用厚度为 0.004m 、曲率半径为 $r = 0.0375\text{m}$ 的圆弧叶片, 采用前弯布置, 整体沿逆时针方向旋转。定义叶片前后缘顶点连线与前缘点和转动中心 O 的连线夹角为叶片倾角 β , 本文中 β 角参考已有横流风扇推进翼相关文献[13] [14]的设计, 取值为 20° 。后文算例的研究主要以叶片个数 n 为几何参数, 取值范围为 12 至 36 片, 间隔 6 片。流场计算域边界采用标准海平面大气环境, $p_\infty = 1.01 \times 10^5 \text{Pa}$, $T_\infty = 288.15\text{K}$, 空气密度为 $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$, 动力粘性系数为 $\mu = 1.79 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。本文所研究的另一个运行参数为风扇转速 ω , 其取值范围 1000rpm 至 4000rpm , 间隔为 1000rpm 。在最大转速 $\omega_{\max} = 4000\text{rpm}$ 时, 横流风扇最大叶尖速度约为 $U_{t_{\max}} = \omega_{\max} D/2 \approx 62.832\text{m/s}$, 小于 0.3Ma , 故数值模拟流场可假定为不可压缩。基于叶尖速度与风扇叶片外径的雷诺数为 $Re = (\rho U_t D_o) / \mu = 3.22 \times 10^5 \sim 1.29 \times 10^6$ 。本文所研究算例共 20 个工况, 具体参数见表 1。其命名方式如 C12_1k, 第一个数字 12 代表叶片数, 第二个数字 1k 代表转速为 1000rpm 。

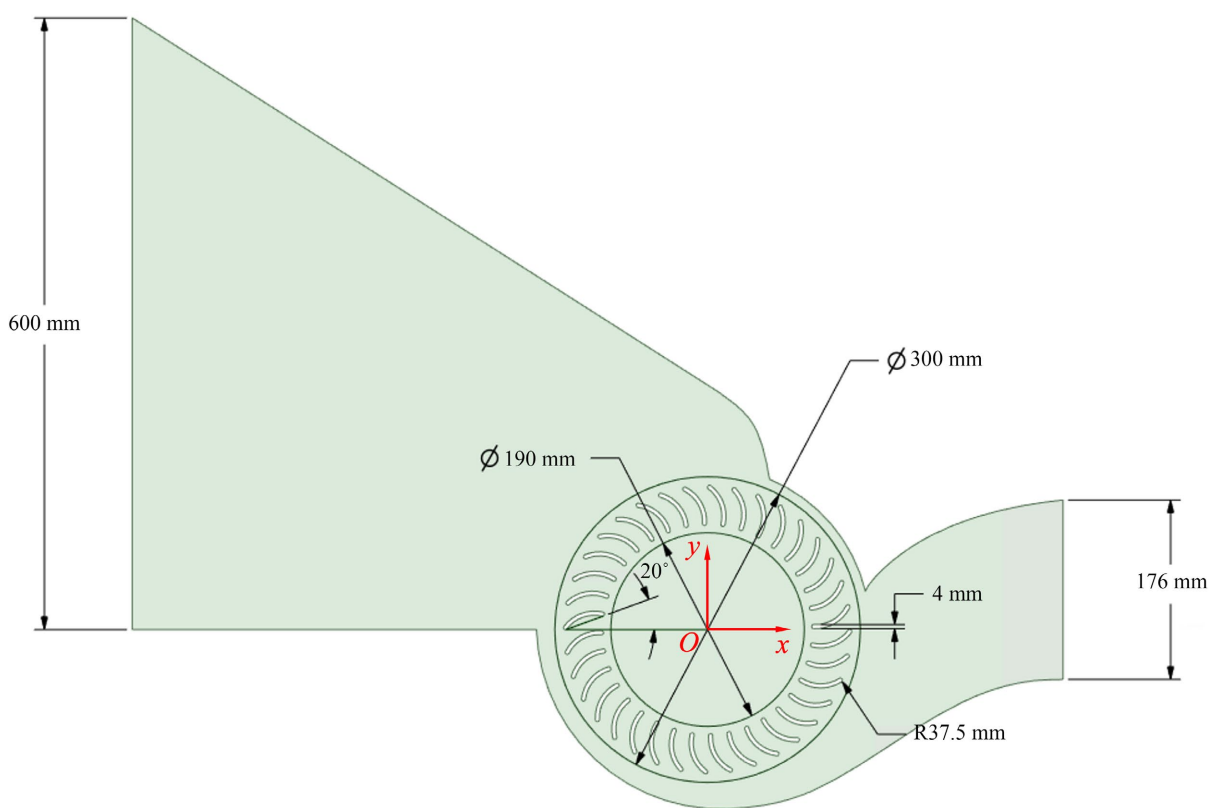


Figure 3. Sketch of geometric characteristics and flow domains of the cross-flow fan

图 3. 横流风扇几何尺寸与流动域示意图

因横流风扇流场中存在叶片区域相对于外部流道壁面的转动运动, 需使用滑移网格来模拟横流风扇叶片的旋转运动。如图 4 所示, 横流风扇流场主要分为三个区域, 即风扇上下游的外部流体域、风扇内部流体域和叶片旋转域。风扇叶片区域以指定转速旋转, 其余两个区域保持静止。整个流场使用混合网格进行离散化。横流风扇叶片表面与流道壁面使用结构网格对边界层流动进行解析, 流场其余区域以非结构网格为主。气流在入口段区域内基本上是均匀流动, 速度不会有显著变化, 因此网格较为稀疏。为了观察叶片对气流的做功细节, 观察近壁面的气流分离现象, 捕捉风扇运行过程中所产生的两个涡结构, 叶片周围的网格和风扇内部区域网格应该尽可能细密。横流风扇叶片旋转域与外部静止流体域的滑移交界面(interface11 和 22), 和其与内部静止流体域的滑移交界面(interface33 和 44)如图 4 所示。

Table 1. Main parameters for the cross-flow fan simulation
表 1. 横流风扇数值模拟研究的主要参数摘要

算例	叶片数 n (个)	转速 ω (rpm)	叶尖速度 U_t (m/s)	雷诺数 Re
C12_1k	12	1000	15.71	3.22×10^5
C12_2k	12	2000	31.42	6.45×10^5
C12_3k	12	3000	47.12	9.67×10^5
C12_4k	12	4000	62.83	1.29×10^6
C18_1k	18	1000	15.71	3.22×10^5
C18_2k	18	2000	31.42	6.45×10^5
C18_3k	18	3000	47.12	9.67×10^5
C18_4k	18	4000	62.83	1.29×10^6
C24_1k	24	1000	15.71	3.22×10^5
C24_2k	24	2000	31.42	6.45×10^5
C24_3k	24	3000	47.12	9.67×10^5
C24_4k	24	4000	62.83	1.29×10^6
C30_1k	30	1000	15.71	3.22×10^5
C30_2k	30	2000	31.42	6.45×10^5
C30_3k	30	3000	47.12	9.67×10^5
C30_4k	30	4000	62.83	1.29×10^6

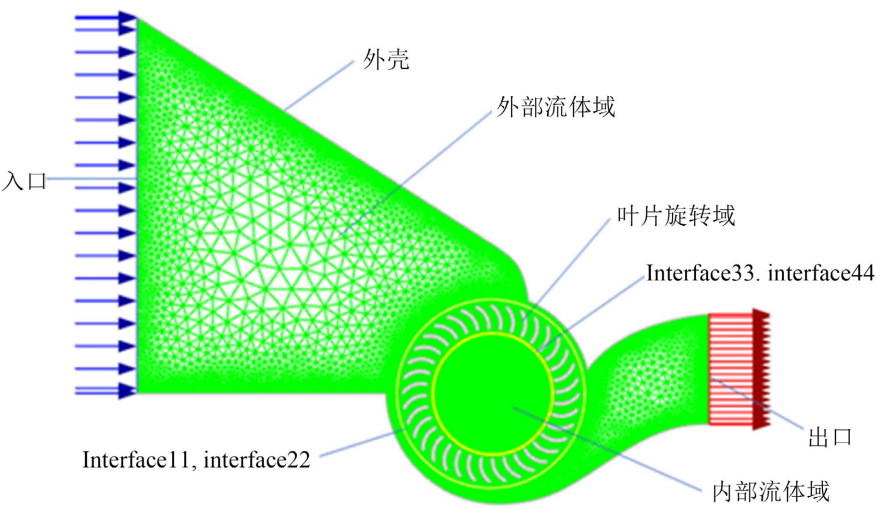


Figure 4. Sliding mesh setting and boundary conditions
图 4. 滑移网格设定与边界条件

本文使用数值模拟软件 ANSYS FLUENT 求解非定常、不可压缩的二维 Navier-Stokes 方程。湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型[15]，并结合增强壁面处理(Enhanced Wall Treatment, EWT)，将线性律和对数律公式混合，在粘性底层和完全湍流层之间建立过渡，从而扩大湍流模型适用范围。该湍流模型在以往二维横流风扇数值模拟研究中得到了广泛的应用与验证[6] [16]-[18]。主要计算方法为有限体积法，压力 - 速度

耦合采用 Coupled 算法。空间离散化方案中, 梯度使用基于单元的最小二乘方法, 压力采用二阶方法, 动量采用二阶迎风方法, 瞬态离散化方案采用一阶显式方法。横流风扇流场由风扇叶片旋转运动做功驱动, 所以在流场上下游边界分别采用压力入口(入口总压为 $p_{\infty,t} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$)和压力出口(出口静压为 $p_{\text{out}} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$)条件。风扇叶片和流道等固体壁面采用无滑移条件。非定常模拟采用固定时间步长进行时间解析。Kummer 和 Dang 的研究表明[6], 对于横流风扇流场, 时间步长应为叶片转动到临近叶片位置所用时间的 1/20。例如, 对于 $n=12$ 的横流风扇, 叶片转动周期可分为 240 个时间步。另外, 以叶片数为 36 的横流风扇模型为例, 在转速为 2000 rpm 时, 基于出口的压力分布和速度分布结果进行了计算网格数量的无关性验证。对 $n=36$ 和 $\beta=20^\circ$ 的横流风扇模型分别划分三种网格, 其网格单元数量分别为: 9.6×10^4 、 1.36×10^5 和 1.92×10^5 。由图 5 可知, 粗糙网格与中等密度网格的结果存在较为明显差异(出口截面压强分布最大相对误差为 7%, 速度分布最大相对误差为 4%); 而中等密度网格与精细网格的结果几乎完全重合, 表明此时网格数量已收敛。因此, 本文使用网格数为 1.36×10^5 的网格进行数值模拟。

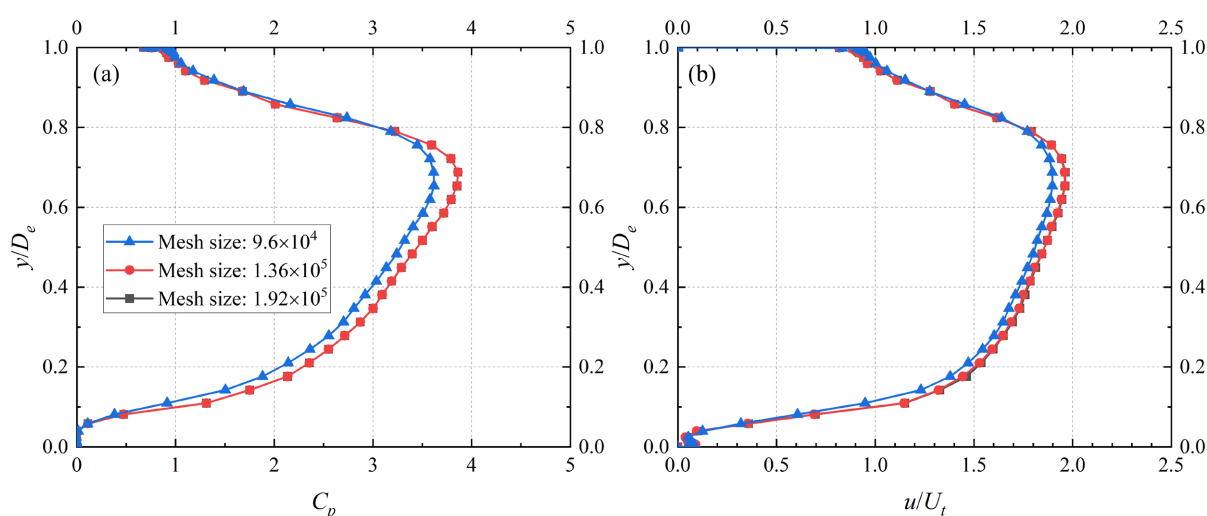


Figure 5. (a) Pressure coefficients and (b) velocity profile distribution at exit plane for three different mesh sizes

图 5. 不同网格数算例的出口截面的(a) 压强系数分布与(b) 速度分布

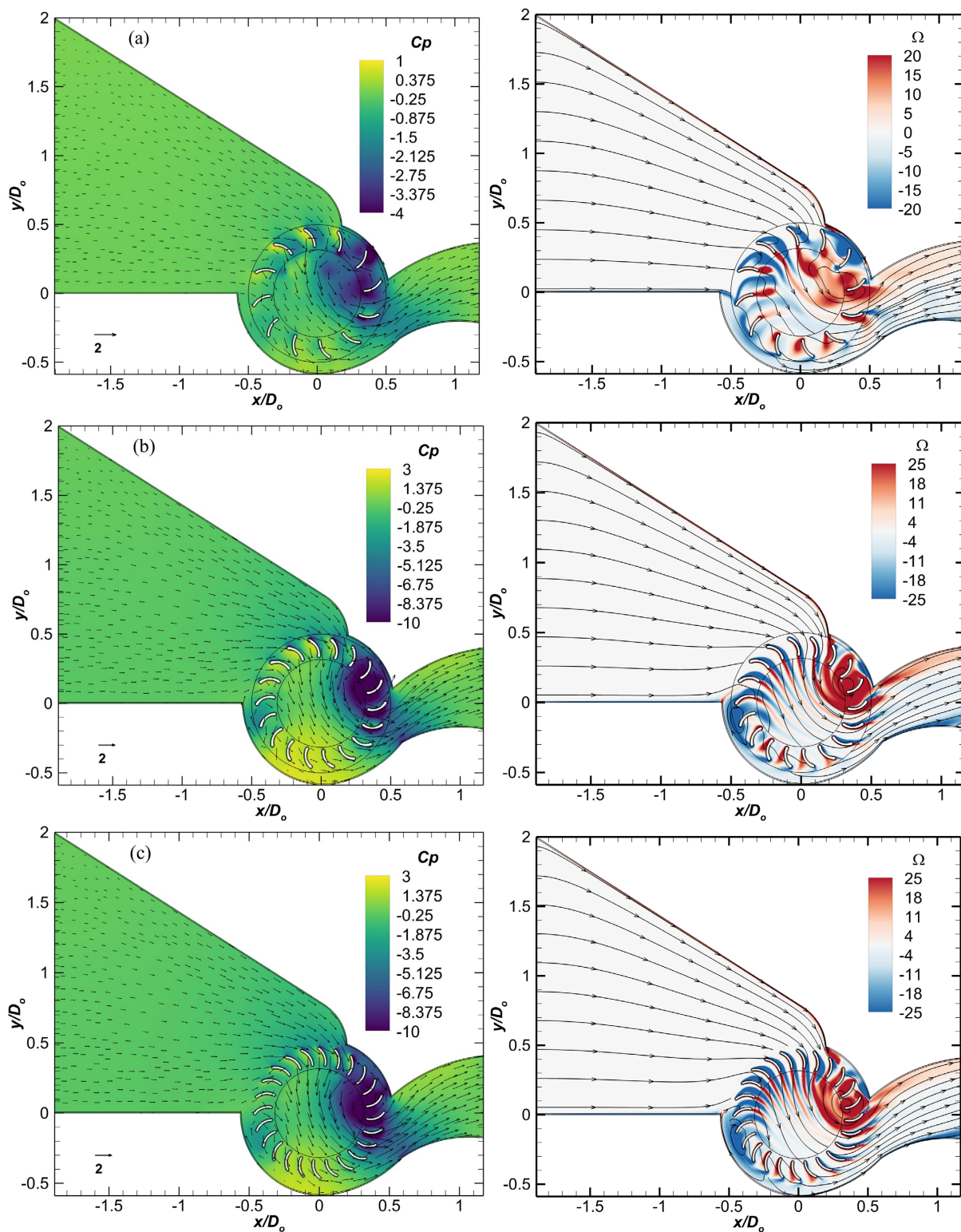
3. 结果与讨论

3.1. 横流风扇内部流动结构演化规律

我们首先以风扇叶片数和转速为参数, 研究横流风扇内部流动结构和风扇驱动性能受其影响的变化规律。已有研究表明, 横流风扇运行时不可避免地在流场中产生偏心涡结构, 起到显著的稳定横流风扇流场的作用。因此, 涡结构的位置和大小对横流风扇性能的影响至关重要。但是另一方面, 在这个区域内, 叶片不对流体做功, 偏心涡结构旋转运动还会耗散流体的动能。

图 6 给出了在 4000 rpm 的转速下, 不同叶片数的横流风扇流动的压强分布、涡量分布等值线图, 以及对应的流线图。总的来说, 不同的叶片数均会产生在叶片逆行区附近的偏心涡和顺行区的外侧的小尺度回流区。偏心涡结构导致流场中低压区的形成, 在涡结构区域内, 流速降低。从图 6(a~b)可见, 当横流风扇仅有 12 片叶片时, 由于叶片分布稀疏, 导致偏心涡结构在流场中形状和位置都不规则, 未呈现典型涡结构的集中涡量分布。且从流场的时间演化结果可以看出, 此时的偏心涡形状与涡核位置也存在不稳定的震荡。叶片表面流动存在显著的前缘分离现象。此时, 由于不稳定气流的干扰, 叶片背风面的分离剪切层涡脱落导致流动失稳, 干扰了横流风扇内部中心通流区的气流, 并在旋转域中形成了几个小尺度

旋涡, 这破坏了从叶片表面产生的涡量对偏心涡强度的补充, 导致偏心涡整体环量降低。另一方面, 偏心涡的非定常震荡与破碎占据了更多的风扇内部空间, 限制了流动的循环和通流区的大小, 进一步影响风扇性能。因此, 较少的叶片对气流做功效果差, 流量系数低, 对风扇做功性能造成不利影响。



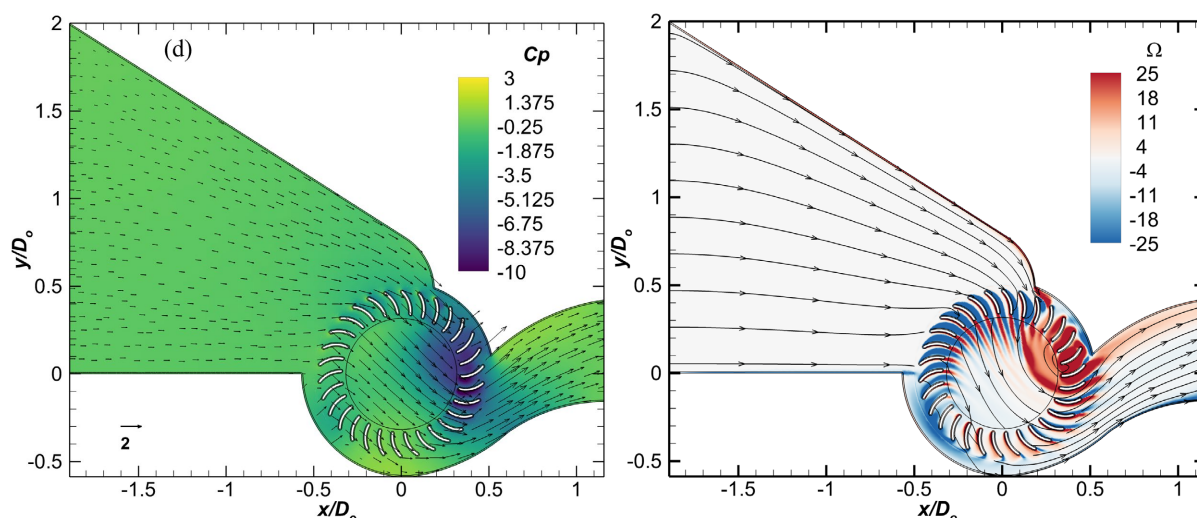


Figure 6. The pressure coefficient contours (left) and vorticity contours (right) of the cross-flow fan flow field at a speed of 4000rpm. (a) 12 blades; (b) 18 blades; (c) 24 blades and (d) 30 blades

图 6. 4000rpm 转速下, 横流风扇流场的压强系数云图(左)与涡量云图(右)。(a) 12 片叶片; (b) 18 片叶片; (c) 24 片叶片和(d) 30 片叶片

当叶片数增加到 18 片时, 如图 6(c~d)所示, 随着间距的减小, 叶片前缘气流分离现象得到抑制, 气流在入口段始终保持附着在叶片表面, 最后从叶片后缘光顺地流入风扇内部区域。由于叶片表面边界层的涡量稳定的脱落, 一方面减小了对偏心涡位置的扰动(相对于 C12_4k 工况), 另一方面也增强了偏心涡的强度。从图 6(c)的压强系数分布可见, 偏心涡核位置产生了一个明显的低压区。由于此时偏心涡结构相对稳定, 涡量分布与结构较为集中, 所以占据空间较小, 气流能量耗散减小, 通流区面积增大, 使叶片对气流做功区域增大, 可增强风扇性能。

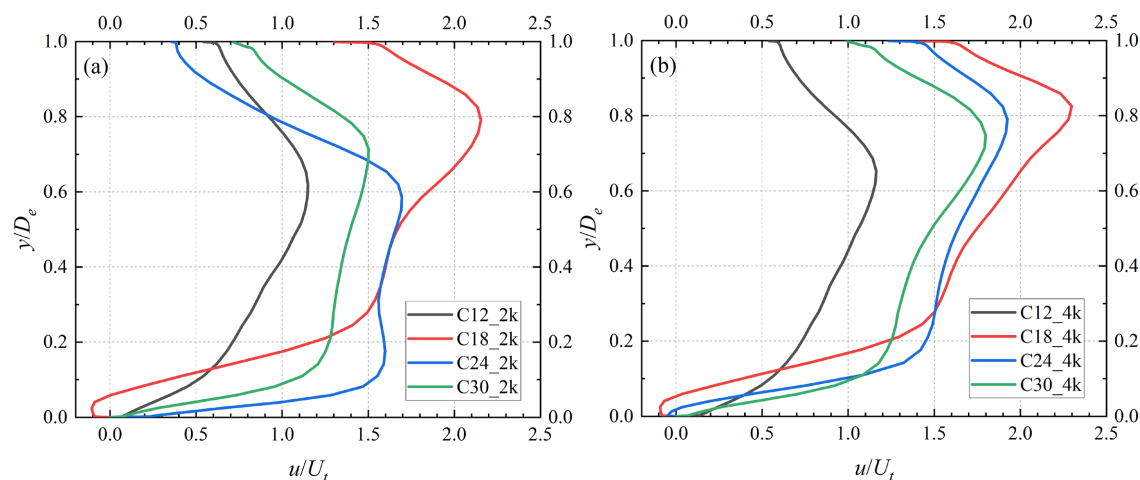


Figure 7. Cross flow fan outlet velocity distribution. (a) 2000 rpm; (b) 4000 rpm

图 7. 横流风扇出口截面速度分布。(a) 2000 rpm; (b) 4000 rpm

随着叶片数进一步增加, 由压强分布与涡量分布(图 6(e~h))可见, 流场结构与偏心涡典型特征与 C18_4k 工况基本类似, 特别是 24 片叶片风扇的流场。当叶片数增加时, 相邻叶片间的流道宽度减小, 对于 C30_4k 工况, 偏心涡自身的强度与产生的低压区的强度都有所衰减。这主要是由于当叶片数增加到

30 片时, 叶片间流道进一步压缩, 导致相同转速下的横流风扇出口处的气流速度与流量反而有所下降。如图 7 所示, 在 2000 rpm 与 4000 rpm 两种转速下, 叶片数对出口截面流向速度分布的影响呈现相同的规律。12 片叶片的横流风扇, 气流很早就从叶片分离, 附面层较厚, 尾迹涡结构干扰较强, 此时出口截面速度最低。而 18 片叶片的横流风扇布局能有效抑制叶片前缘气流分离, 流动损失小, 因此叶片周围气体获得极高的速度, 出口截面速度最大, 且峰值下靠近上缘的 80% 出口高度处。但是, 随着叶片数的进一步增加, 阻塞效应越发明显, 导致出口速度大小逐渐降低, 但速度分布曲线基本保持不变。

基于横流风扇内部的偏心涡结构与叶片附近流动分离现象的分析, 可以看出 12 片叶片的横流风扇, 叶片涡的脱落无组织, 对通流区气流会造成很大影响, 而且偏心涡结构占据区域大, 强度低, 且其核心位置存在非定常震荡, 导致风扇性能低。18 片叶片布局的横流风扇, 叶片脱落涡对通流区气流影响减少, 涡结构强度高, 占据空间小, 风扇性能好。叶片数的进一步增加至 24 和 30 片时, 虽然同样不存在叶片前缘附近流动分离, 但叶片间流动通道宽度会对风扇做功能力的提升产生不利影响, 导致出口速度和流量逐渐降低, 另外, 还观察了叶片周围的流场, 发现气流流经叶片时的流动分离现象, 流动分离和尾迹会造成动能的耗散, 应抑制流动分离。综上, 基于横流风扇流场内部的偏心涡结构的稳定性与强度随风扇叶片数的变化规律可知, 叶片为 18 片时风扇对气流的做功效果最好, 效率最大。

3.2. 横流风扇驱动性能分析

基于上述叶片数与转速对横流风扇内部流动结构的影响规律研究, 本节将从总压比、流量系数和总效率等无量纲参数的角度分析时均流场与风扇性能的内在联系, 为应用于航空推进的横流风扇设计提供理论依据。

在流动达到周期稳定的情况下, 计算风扇的流量系数、出入口总压比和总效率, 并评估横流风扇对气流的驱动性能。总压比定义为风扇出口总压和入口总压的比值, $R_p = P_{T,out} / P_{T,in}$ 。质量流量定义为单位时间内通过风扇出入口截面积的流体质量, 其数值越高代表风扇吸/吹气的效果越好, 通常以无量纲化的流量系数 φ 作为参数来研究质量流量的变化规律, 其定义为:

$$\varphi = \frac{Q}{D_o U_t} \quad (1)$$

其中 Q 为单位展向长度的体积流量, D_o 为风扇叶片外径, U_t 为风扇叶尖速度。另一方面, 横流风扇的总效率 η_T 定义为:

$$\eta_T = \frac{Q \Delta P_T}{\tau} \quad (2)$$

其中 $\Delta P_T = P_{T,out} - P_{T,in}$ 为出入口的总压差, Ω 为风扇速度(rad/s), τ 为风扇扭矩, 通过对所有叶片相对转轴的力矩在风扇稳定运行后一个旋转周期内进行时间平均求得。

对不同叶片数的横流风扇数值模拟结果进行分析, 在转速为 2000 rpm 时, 由图 8 所示, 流量系数在叶片数从 12 增加到 18 时明显提升。但是在叶片数继续增加后质量流量会缓慢下降, 在叶片数为 30 时的流量系数仍高于 12 片的情况。总压比反映的是横流风扇对气流的加速做功能力。从图 8 可以看出, 总压比跟流量系数有着相同的变化规律, 12 片叶片时横流风扇出入口之间的总压比最小, 18 片时明显增大, 后面继续增加叶片数会使参数减小。可见, 横流风扇在 18 片叶片布局时获得最高的流量系数和总压比。

风扇叶片所受的合力矩 T 反映了气流与叶片之间的相互作用, 与风扇输入的轴功率密切相关。图 9 为转速 2000 rpm 下不同叶片数横流风扇叶片力矩大小变化。可以看出, 由于叶片旋转运动的周期性, 且气流将会在叶片表面(在前缘或者后缘, 如图 6 所示)发生流动分离, 因此叶片上所受的力矩也会随时间发生周期性的振荡, 且叶片数越多, 振荡频率越快。图 8 中的数值表示的是不同工况下, 风扇所受力矩的时

均值。该数值随叶片数的变化趋势也和总压比和流量系数等参数相似, 12 片时叶片所受力矩大小最小, 18 片时力矩大小显著增大, 从 18 片增加到 30 片的过程中, 力矩大小会减小。叶片上的力矩大小反映了叶片对气流做功效果的强弱, 大的力矩说明叶片对气流做功效果好, 但是力矩大也会使风扇的总效率有所下降。

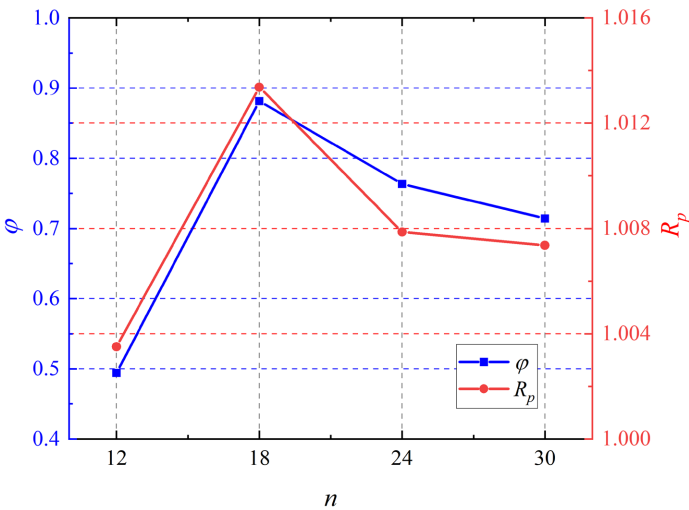


Figure 8. Flow coefficient and total pressure ratio for cross-flow fans with different blade numbers at a speed of 2000 rpm
图 8. 转速 2000 rpm 时, 不同叶片数横流风扇的流量系数与总压比

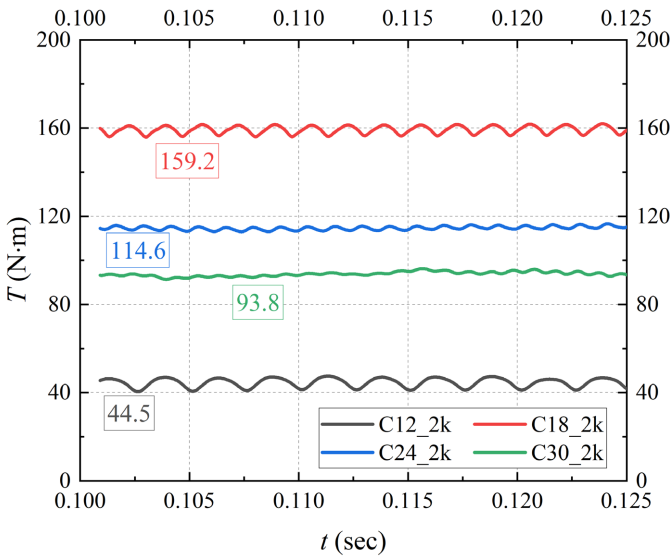


Figure 9. Blade torque of cross-flow fans with different blade numbers at a speed of 2000 rpm
图 9. 转速 2000 rpm 时不同叶片数横流风扇的叶片力矩曲线

根据以上参数, 可以计算出各算例横流风扇的总效率。如图 10 所示, 在转速为 2000 rpm 情况下, 在叶片数为 18 时, 总效率达到这些算例中的最大值, 为 34.01%。叶片数为 24 的横流风扇虽然相对 30 的叶片数获得了更高的流量系数和总压比, 但是从图 9 可见 24 片叶片布局时叶片所受力矩较大, 所以其总效率略低于 30 片叶片布局的横流风扇。因此可以得出结论, 18 片叶片相对于计算所用到的其他叶片数, 能使横流风扇获得较优的性能。

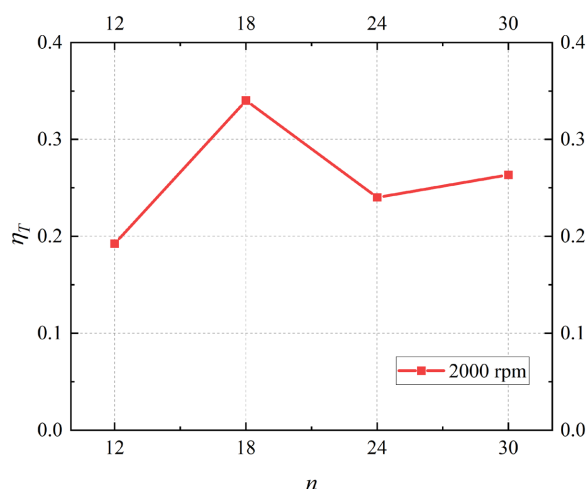
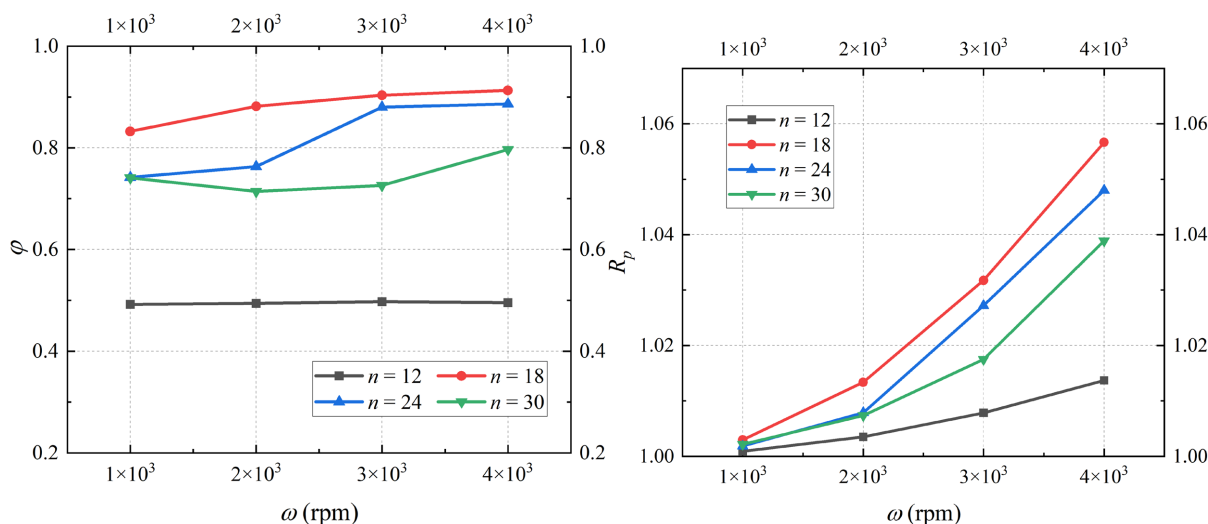


Figure 10. Total efficiency of cross flow fans with different blade numbers at a speed of 2000 rpm
图 10. 转速 2000 rpm 时不同叶片数横流风扇的总效率

横流风扇转速是影响其做功能力与驱动效率的另一个重要参数。总的来说,当风扇转速从 1000 rpm 增加到 4000 rpm 时,本文所有叶片数算例的总压比均得到提升;叶片数 18 和 24 的算例在增大转速过程中流量系数也随之提升;叶片数 24 和 30 的算例总效率随转速增大而增大。从图 11(a)可以看出,12 片布局的横流风扇,增大转速对流量系数影响不大,但是总压比随之增大。当转速从 1000 rpm 增大到 2000 rpm 时,总效率增加比较明显,但在此基础上再增加转速时,总效率相对 2000 rpm 时会降低。这是因为对于 12 片叶片的横流风扇而言,由于叶片分布稀疏,无法有效地对气流做功,低转速时效率较低;提高转速后,虽然总压比有所提升,但是提高转速所用的能量无法有效转化为气流的动能,就会导致提高转速时总效率降低。18 片叶片时,总效率在从 1000 rpm 变化到 3000 rpm 时逐渐增加,但是在 3000 变化到 4000 rpm 时略微减小。对于 24 片叶片的横流风扇,转速对流量系数的影响最为明显,转速提升对它带来的影响较为显著。1000 rpm 时流量系数为 0.742,4000 rpm 时流量系数显著提高为 0.886,总效率也从 23.05% 提升到 28.69%。在 1000 rpm 时,24 片叶片横流风扇的总效率是低于 30 片叶片的;但是在提升转速后,24 片叶片横流风扇的总效率在 3000 rpm 后高于 30 片。因此,对于在低速旋转时性能参数较低的叶片数的横流风扇,通过提高转速能有效提升风扇对气流做功的能力,提高风扇性能。



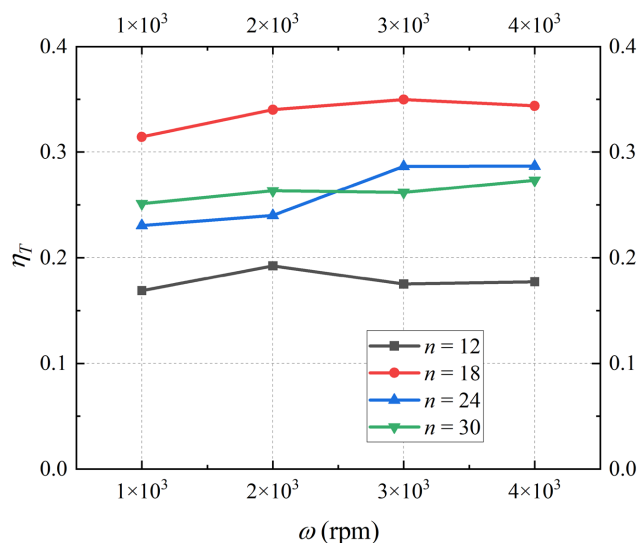


Figure 11. The (a) flow coefficient; (b) total pressure ratio, and (c) total efficiency of a cross-flow fan at different rotational speeds

图 11. 不同转速下, 横流风扇的(a) 流量系数; (b) 总压比和; (c) 总效率

综合考虑可以得出, 横流风扇的总效率在 3000 rpm 之后的变化就不明显, 总效率的影响可以忽略。所以, 18 片叶片的风扇在 3000 rpm 的转速下在本文研究的算例中具有最优的性能。相比 1000 rpm, 它的流量系数从 0.8323 升至 0.9033, 总效率从 31.45% 升至 34.98%。对于叶片数固定的横流风扇, 增加转速会使一些性能参数得到提升, 但对于叶片过于稀疏, 低转速下总效率极低的风扇, 提高转速会使能量损失增大, 总效率降低, 性能降低。并且不同叶片数的横流风扇对转速变化的敏感度不同, 24 片叶片的算例提高转速时参数变化较为明显, 流量系数、总效率等都有很明显的提升。在低转速工况下性能不好的横流风扇, 可以考虑提高转速来获得优秀的性能。

4. 结论

本文针对不同叶片数和转速的横流风扇模型进行了数值模拟研究。研究表明, 在本文所选的风扇叶片数范围内, 18 片叶片布局的横流风扇相对其他叶片数的横流风扇具备更高的质量流量系数、总压比和流量系数, 因此有最高总效率。该叶片数布局能有效减小叶片附面层的厚度, 气流不易发生前缘分离, 减少了流动损失, 提高了风扇性能。叶片数较少时因间距过于稀疏, 存在叶片前缘流动分离, 对通流区气流会造成很大影响, 而且偏心涡结构占据区域大, 强度低, 且其核心位置存在非定常震荡, 导致风扇性能低。叶片数超过 30 片时, 叶片间流动通道宽度会对风扇做功能力的提升产生不利影响, 导致出口速度和流量逐渐降低。另一方面, 风扇转速的增加会使所有叶片数工况的总压比均得到提升。叶片数 18 和 24 的算例在增大转速过程中流量系数也随之提升。除了叶片数最少的情况, 风扇的总效率随转速的增加而增加, 但是在转速超过 3000 rpm 时不会再有进一步增加。因此, 本文研究中性能最优的风扇设计应为 18 片叶片布局, 3000 rpm 的转速设置, 其总效率达到 34.98%。下一步的研究将考虑横流风扇与不同翼型的耦合模型, 并设置能代表机翼边界层的非均匀入口速度剖面, 以揭示更贴近实际应用的边界层吸入(BLI)效应对横流风扇性能影响的物理机理。

基金项目

本文受四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目(2023YFH0084)的资助。

参考文献

- [1] 孔祥浩, 张卓然, 陆嘉伟, 等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 51-67.
- [2] 黄俊. 分布式电推进飞机设计技术综述[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 7-23.
- [3] Borer, N.K., Wallace, R.D., Reynolds, J.R., Cox, D.E., Sales, C., Williams, T.L. and Ringelberg, W.M. (2024) Distributed Thrust Takeoff for the NASA X-57 Mod IV Flight Demonstrator. *The 34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, Firenze, 9-13 September 2024.
- [4] Kummer, J.D. and Dang, T.Q. (2006) High-Lift Propulsive Airfoil with Integrated Crossflow Fan. *Journal of Aircraft*, **43**, 1059-1068. <https://doi.org/10.2514/1.17610>
- [5] Lazzarotto, L., Lazzaretto, A., Martegani, A.D. and Macor, A. (2001) On Cross-Flow Fan Similarity: Effects of Casing Shape. *Journal of Fluids Engineering*, **123**, 523-531. <https://doi.org/10.1115/1.1379033>
- [6] Vanaei, H.R., Khelladi, S., Dobrev, I., Bakir, F., Himeur, R.M., Mammeri, A., *et al.* (2023) Performance and Efficiency of Cross-Flow Fans—A Review. *Energies*, **16**, Article 7798. <https://doi.org/10.3390/en16237798>
- [7] Dang, T.Q. and Bushnell, P.R. (2009) Aerodynamics of Cross-Flow Fans and Their Application to Aircraft Propulsion and Flow Control. *Progress in Aerospace Sciences*, **45**, 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2008.10.002>
- [8] 孟琳, 叶永强, 李楠. 扇翼飞行器的研究进展与应用前景[J]. 航空学报, 2015, 36(8): 2651-2661.
- [9] 杜思亮. 扇翼空气动力特性数值模拟与试验研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [10] Lu, J., Lu, Y., Wang, J., Xu, X., Shao, M. and Tang, Z. (2024) Numerical Study on the Hydrodynamic Performance and Wake Dynamics of Propulsive Wing Propulsors with Different Cross-Flow Fans. *Physics of Fluids*, **36**, Article ID: 0180221. <https://doi.org/10.1063/5.0180221>
- [11] Peebles, P. (2003) Aerodynamic Lift Generating Device. US Patent No.6,527,229B1.
- [12] Moon, Y.J., Cho, Y. and Nam, H. (2003) Computation of Unsteady Viscous Flow and Aeroacoustic Noise of Cross Flow Fans. *Computers & Fluids*, **32**, 995-1015. [https://doi.org/10.1016/s0045-7930\(02\)00068-3](https://doi.org/10.1016/s0045-7930(02)00068-3)
- [13] Lu, J., Lu, Y., Wang, J., Xu, X. and Shao, M. (2023) Numerical Investigation of the Quasi-Vortex-Ring State of the Propulsive Wing in Vertical Descent. *Aerospace Science and Technology*, **132**, Article ID: 108075. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.108075>
- [14] Lu, J., Lu, Y., Zhang, R., Wang, J. and Tang, Z. (2023) Numerical Study on Hydrodynamic Performance of an Underwater Propulsive Wing Propulsor. *Ocean Engineering*, **285**, Article ID: 115293. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115293>
- [15] Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1972) *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press.
- [16] Dygert, R.K. and Dang, T.Q. (2009) Experimental Investigation of Embedded Crossflow Fan for Airfoil Propulsion/Circulation Control. *Journal of Propulsion and Power*, **25**, 196-203. <https://doi.org/10.2514/1.37110>
- [17] Seo, H., Kim, J. and Kim, Y. (2009) The Effect of Blade Angle on the Flow and Pressure Distributions in the Vicinity of the Diffuser Blades of a Room Air Conditioner. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **23**, 1840-1845. <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0612-0>
- [18] Kasem, A., Gamal, A., Hany, A., Gaballa, H., Ahmed, K., Romany, M., *et al.* (2019) Design and Implementation of an Unmanned Aerial Vehicle with Self-Propulsive Wing. *Advances in Mechanical Engineering*, **11**, 1-10. <https://doi.org/10.1177/1687814019857299>