

350 kW 级涵道风扇气动特性数值模拟研究

曾培能, 韦威, 史善广, 杨元英

(中国航发湖南动力机械研究所 中小型航空发动机叶轮机械湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412002)

摘要:采用三维数值模拟方法对350 kW级涵道风扇进行了性能仿真分析,获取了350 kW级涵道风扇不同倾转角度下及垂直姿态不同侧风条件下的气动特性。结果表明:在10 m/s的迎风条件下,倾转角度对涵道风扇的气动特性会产生较明显的影响,随着倾转角度 α 的增大,涵道拉力、转子拉力、总拉力、功率以及力效均呈现先增大后减小的趋势,且在 $\alpha = 60^\circ$ 时达到峰值;倾转角度对涵道拉力的影响比对风扇转子拉力及功率的影响更为明显,倾转角度对唇口附近区域的流动情况影响较为显著;垂直姿态下,侧风速度对涵道风扇的影响主要体现在涵道性能的变化,涵道风扇力效的改变主要由涵道性能决定;侧风会导致涵道风扇转子进口轴向速度重新分布,影响较为明显的区域主要集中在50%叶高以上。

关键词:涵道风扇;倾转角度;侧风;数值模拟

中图分类号:V231.3 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.09.008

[引用本文格式]曾培能,韦威,史善广,等.350 kW级涵道风扇气动特性数值模拟研究[J].热能动力工程,2024,39(9):61-70.
ZENG Peineng, WEI Wei, SHI Shanguang, et al. Simulation study on aerodynamic characteristics of 350 kW ducted-fan[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 61-70.

Simulation Study on Aerodynamic Characteristics of 350 kW Ducted-Fan

ZENG Peineng, WEI Wei, SHI Shanguang, YANG Yuanying

(Hunan Key Laboratory of Turbomachinery on Small and Medium Aero-Engine, AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou, China, Post Code: 412002)

Abstract: Adopting 3-D numerical method, the performance simulation analysis of 350 kW ducted-fan was carried out. The aerodynamic characteristics of 350 kW ducted-fan at different tilt angles and different crosswind velocities under vertical attitude were obtained. The results show that under the 10 m/s windward condition, the tilt angle has a significant influence on the aerodynamic characteristics of the ducted fan. With the increase of the tilt angle α , the ducted tension, rotor tension, total tension, power and force efficiency all show a trend of increasing first and then decreasing. At $\alpha = 60^\circ$, the peak is reached. The influence of the tilt angle on the ducted tension is more obvious than that on the fan rotor tension and power. And the influence of the tilt angle on the flow in the area near the lip opening is more obvious. Under vertical attitude, the influence of crosswind velocity on the ducted fan is mainly reflected in the change of the ducted fan performance, and the change of the ducted fan force efficiency is mainly determined by the ducted fan performance. Crosswind results in a redistribution of axial velocity at the inlet of the ducted fan rotor, with the most significant impact concentrated in areas above 50% blade height.

Key words: ducted-fan, tilt angle, crosswind, numerical simulation

引 言

涵道风扇诞生较早,早在 20 世纪 50 年代美国 NASA 就对涵道风扇进行了大量的试验研究,并且同期美国和法国将其在载人飞行器上进行了应用。其中,比较有代表性的是美国的 X-22A 和法国的 Nord-500。但经过近 50 年的发展,涵道风扇并未得到广泛的应用,其主要的应用场景有两类,一类是微小型飞行器,另一类是直升机涵道尾桨。直至进入 21 世纪,随着全球进入新能源时代,作为城市空中交通(UAM)工具的主力军,电动垂直起降飞行器(eVTOL)的兴起给涵道风扇提供了全新的应用场景,这使得涵道风扇的大规模应用成为可能。

在垂直起降场景下,涵道风扇需要具备倾转功能,涵道风扇面临着需要在不同倾角下工作的情况。同时,在实际使用场景中,侧风条件也是其必须要考虑的工况。但相关研究表明,涵道风扇在有迎角飞行时,气动特性复杂,难以操控^[1-2]。

目前,国内外学者已经对涵道风扇进行了大量的研究工作。国外的研究主要集中在上世纪 40 ~ 70 年代,美国的 Platt 及 Taylor^[3-4]通过实验对涵道风扇的几何设计参数进行了详细的研究。Gray 等人^[5]通过建立涵道风扇的涡系模型得到用于计算涵道风扇气动性能的方法。Borst^[6]对叶素理论用于涵道风扇气动性能计算的方法进行研究。2003 年,美国 Guerrero 等人^[7]提出了涵道风扇 OVA 计算方法。2010 年, Lee^[8]对涵道风扇在悬停及前飞状态下的性能进行了详细试验研究,并与不带涵道的转子性能进行了对比,研究结果显示,涵道风扇构型对微型飞行器具有较大优势。

国内的徐国华等人^[9]在 1990 年依据动量理论提出了涵道风扇的滑流理论。李建波等人^[10]对涵道风扇进行了风洞吹风试验研究,结果显示,涵道风扇的涵道阻力较大,作为升力装置仅适用于强调悬停和低速飞行性能的飞行器。叶坤等人^[11]的研究结果显示,涵道唇口形成的负压是产生涵道附加拉力的主要因素。邓阳平等人^[12]的计算分析显示,桨尖间隙越小涵道产生的附加拉力越大。李晓华等人^[13]针对涵道风扇的外形参数对气动特性的影响进行了研究,结果显示,涵道扩张角在 8.2° 附近时功率系数相对较小,扩张角的增大使得在桨盘下游

易出现气流分离。姬乐强等人^[14]对涵道唇口半径、扩散角、叶尖间隙以及桨盘轴向位置进行了研究,获取了各参数对气动特性的影响规律。王海鹏^[15]对涵道风扇进行了参数敏感性分析,王强^[16]的研究结果显示,设计合理的涵道可以抑制桨尖涡的产生,孔庆旗^[17]指出涵道对风扇桨尖涡的抑制作用是涵道风扇系统增升的原因。Akturk 等人^[18]采用 PIV 测量对某 5 英寸涵道风扇进行了研究,表明侧风对涵道风扇的性能有明显影响。Deng 等人^[19]对对转涵道风扇的转速、攻角、来流速度及地面效应等进行了试验研究。

目前,国内外学者对涵道风扇的研究多集中在计算模型、设计方法的建立以及设计参数对涵道风扇性能的影响,对倾转过程及垂直等姿态条件下风扇性能的研究较少,姿态条件下的性能变化规律及流动机理尚不十分明确。因此,有必要开展涵道风扇在不同姿态条件及不同来流条件下的特性研究,以进一步揭示涵道风扇在不同姿态条件下的流动规律。本文采用数值模拟的方法详细分析了某涵道风扇在不同倾转角度下及垂直姿态不同侧风条件下的气动特性及流场细节。

1 数值方法

1.1 数值模拟方法

采用商用软件 ANSYS CFX 并利用多重参考坐标系(MRF)技术对涵道风扇进行三维定常数值模拟,数值模拟计算域设置如图 1 所示。

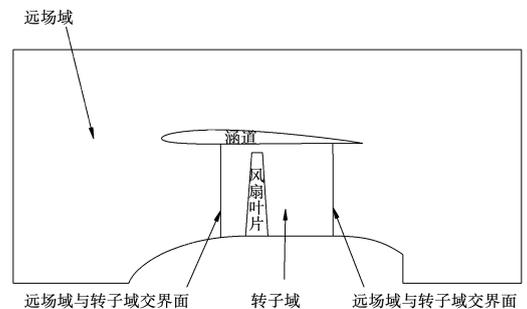


图 1 数值模拟计算域设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computational domain setting by numerical simulation

转子域网格采用 TurboGrid 模块生成高质量结构化网格,远场域采用 ICEM 划分六面体结构化网格。远场边界在径向上取 8 倍转子半径,前方和后

方均取5倍转子半径。转子网格数约120万,远场网格数约600万。涵道风扇网格如图2所示。

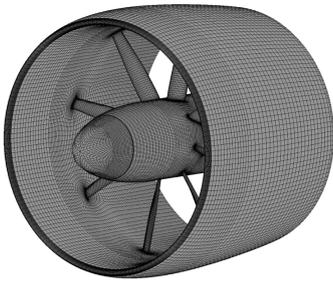


图2 涵道风扇网格

Fig. 2 Grid of ducted-fan

在整个计算域给定参考压力 101 325 Pa;远场进口边界给定压力 0 Pa,来流的速度和方向以及静温 288.15 K;出口给定压力 0 Pa;开放边界给定静温 288.15 K 及压力 0 Pa。湍流模型采用 SST 模型。

1.2 计算模型

涵道风扇姿态定义如图3所示。定义涵道风扇中心线与水平线的夹角为不同倾转姿态的倾转角 α ,垂直姿态时 $\alpha = 90^\circ$ 。

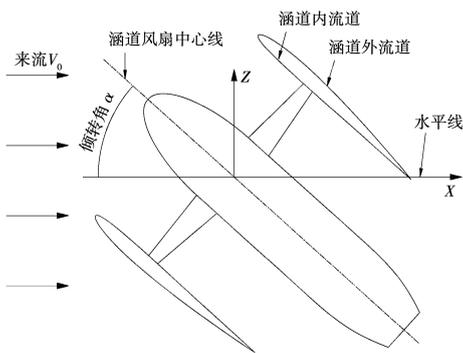


图3 涵道风扇姿态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ducted-fan attitude

采用拉力系数、功率系数、前进比和力效率量化涵道风扇的性能,定义如下:

前进比:

$$\lambda = V_0 / n_s D \quad (1)$$

拉力系数:

$$C_T = T / \rho n_s^2 D^4 \quad (2)$$

功率系数:

$$C_p = P / \rho n_s^3 D^5 \quad (3)$$

定义力效:

$$FM = T/P \quad (4)$$

式中: V_0 —来流速度,m/s; n_s —风扇转速,r/s; D —风扇转子外径,m; T —涵道风扇总拉力,N; ρ —来流密度, kg/m^3 ; P —功率,W。

1.3 计算方法校验

1.3.1 网格无关性分析

选取涵道风扇悬停无侧风工况进行网格无关性分析,计算结果见表1。表1中,拉力变化幅度和功率变化幅度表示采用当前方案的计算结果相对于采用方案1网格计算结果的变化幅度。可以看出,在网格数达到方案2后,随着网格数的增加计算结果变化幅度明显变缓,方案3网格计算结果与方案4计算结果相差不超过0.13%,方案2网格计算结果与方案4网格计算结果相差不超过0.50%。综合考虑计算资源及计算耗时,选取方案2网格数进行本文的数值模拟研究。

表1 网格无关性验证结果

Tab. 1 Grid independence verification result

方案	远场网格/万	转子网格/万	拉力/N	拉力变化幅度/%	功率/kW	功率变化幅度/%
1	300	60	4 793.2	-	337.2	-
2	600	120	4 841.2	1.30	343.9	1.20
3	900	240	4 865.7	1.62	346.0	1.60
4	1200	480	4 870.6	1.75	346.3	1.70

1.3.2 计算方法精度分析

为验证数值模拟方法的精度,对文献[20]中的涵道风扇进行性能计算,并与试验结果进行对比。该涵道风扇转子叶尖直径1.21 m,叶片数8。

图4、图5给出了数值模拟与文献[20]试验的涵道风扇特性结果。在前进比小于0.3时,数值计算结果与试验结果吻合较好;在大前进比条件下数值计算结果与试验结果存在一定差异。表2和表3给出了数值模拟与试验的涵道风扇特性结果及偏差值。可以看出,在前进比不大于0.24时, C_T 和 C_p 数值模拟结果与试验结果偏差不大于5.1%;在前进比超过0.24后,最大偏差达到13.1%。由于本文的工作是针对小前进比工况进行研究,因此本文的三维数值模拟方法较为可靠,能够有效预测涵道风扇气动性能。

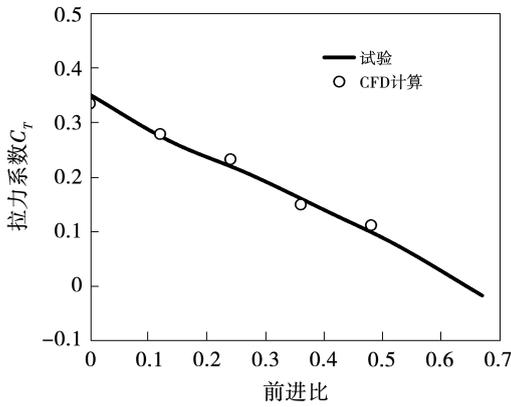


图4 功率系数

Fig. 4 Power coefficient

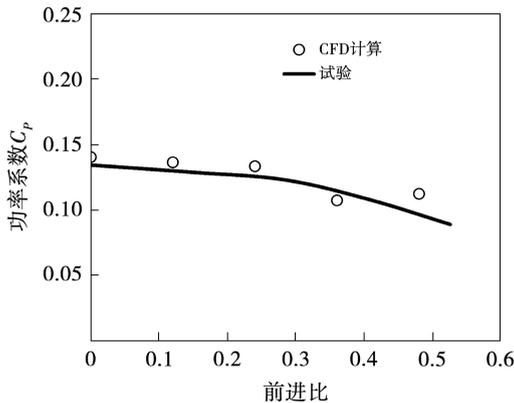


图5 拉力系数

Fig. 5 Tension coefficient

表2 拉力系数偏差结果

Tab. 2 Deviation result of tension coefficient

前进比	CFD 计算 C_T	试验 C_T	偏差/%
0	0.335	0.351	-4.7
0.12	0.279	0.275	1.5
0.24	0.233	0.222	5.0
0.36	0.150	0.161	-6.9
0.48	0.112	0.099	13.1

表3 功率系数偏差结果

Tab. 3 Deviation result of power coefficient

前进比	CFD 计算 C_P	试验 C_P	偏差/%
0	0.140	0.134	4.6
0.12	0.136	0.130	5.0
0.24	0.132	0.126	5.1
0.36	0.107	0.114	-6.4
0.48	0.112	0.100	12.0

2 结果及分析

2.1 倾转姿态特性分析

针对 $V_0 = 10 \text{ m/s}$ 的迎风条件,对涵道风扇在不

同倾转角度下的气动特性进行了仿真。图6、图7给出涵道风扇的涵道拉力、转子拉力、总拉力、功率以及力效随倾转角度的变化规律。可以看出,随着倾转角度 α 的增大,涵道拉力、转子拉力、总拉力、功率以及力效均呈现先增大后减小的趋势,且在 $\alpha = 60^\circ$ 时达到峰值。这说明在 10 m/s 的迎风条件下,倾转角度对涵道风扇的气动特性会产生较明显的影响。

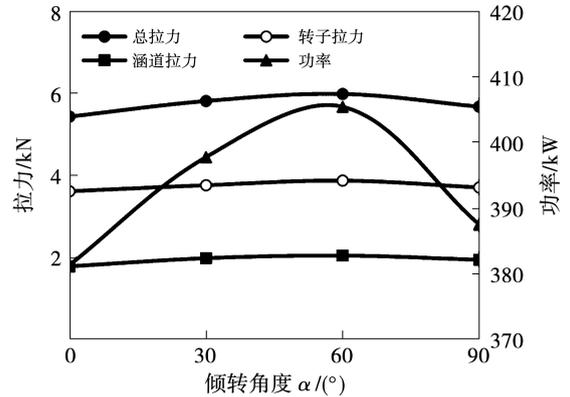


图6 涵道风扇特性随倾转角度的变化

Fig. 6 Variation of ducted-fan characteristics with tilt angle

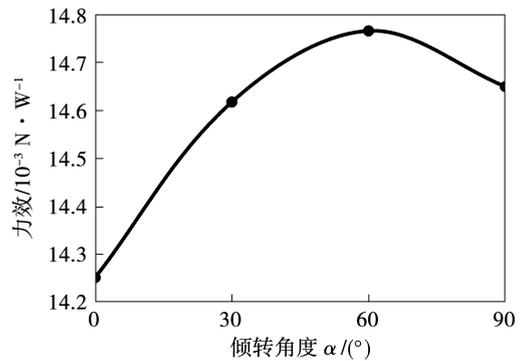


图7 涵道风扇力效随倾转角度的变化

Fig. 7 Variation of ducted fan force efficiency with tilt angle

以 $\alpha = 0^\circ$ 的特性为基准,表4给出其他倾转角度下的特性变化情况。数据显示,变化幅度最大的是涵道拉力,达14.18%。倾转角度对涵道拉力的影响比对转子拉力及功率的影响更为明显。考虑到涵道的拉力主要来源于唇口气流加速形成的负压,说明倾转角度对唇口附近区域的流动情况有明显影响。在 α 为 30° 和 60° 状态时,涵道风扇的流量有一定幅度的增加,在 $\alpha = 90^\circ$ 的垂直状态时,涵道风扇

的流量较 $\alpha = 0^\circ$ 的水平状态减小了 4.93%。

表4 涵道气动特性变化规律

Tab.4 Variation law of duct aerodynamic characteristics

参数	变化幅度/%		
	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
流量	1.89	1.64	-4.93
功率	4.34	6.33	1.64
涵道拉力	9.96	14.18	8.31
转子拉力	4.63	7.50	2.29
总拉力	6.41	9.73	4.30
力效	1.98	3.20	2.61

图8、图9给出不同倾转角度下迎风侧和背风侧涵道壁面静压沿流向的分布。其中,对流向位置进行了归一划处理。

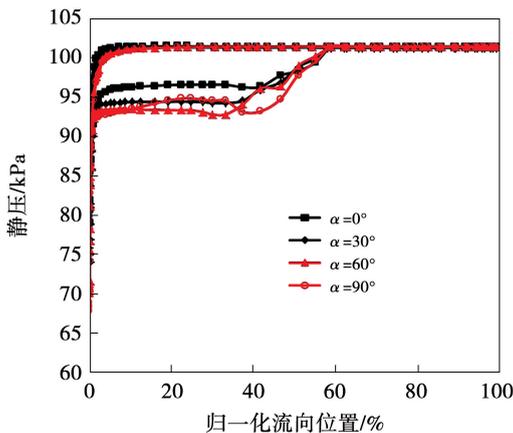


图8 迎风侧涵道壁面静压分布

Fig.8 Static pressure distribution on windward side wall of duct

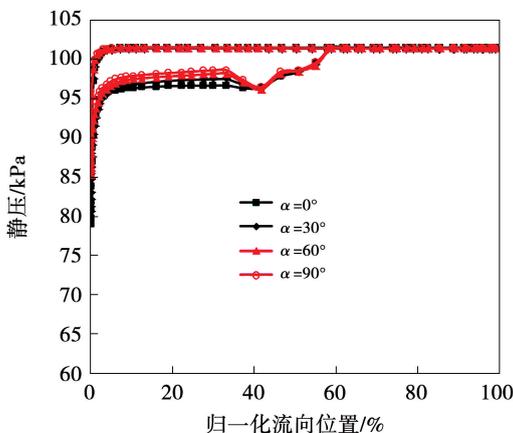


图9 背风侧涵道壁面静压分布

Fig.9 Static pressure distribution on leeward side wall of duct

从图中可以看出,倾转角度对迎风侧涵道壁面静压的影响较背风侧更为明显。在迎风侧和背风侧不同倾转角度下涵道外流道的壁面静压分布变化较小,说明倾转角度对外流道壁面的流动影响较小。在迎风侧,不同倾转角度下内流道壁面静压差异主要集中在前40%流向区域, α 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 区间,壁面静压随倾转角度的增加持续降低,说明在该角度范围内倾转角增加使得迎风侧涵道内流道气流加速更加明显,风扇吸流作用更强;与 $\alpha = 60^\circ$ 时相比, $\alpha = 90^\circ$ 时,在约10%流向区域内,涵道内流道壁面静压未发生变化,在10%~35%流向区域内,涵道内流道的壁面静压先增大至高于 $\alpha = 60^\circ$ 时的静压分布,在约35%流向位置处开始快速减小。在背风侧,倾转角度对涵道壁面静压的影响同样集中在前40%流向区域,且随着倾转角度的增加涵道内流道壁面静压呈现增加的趋势。

图10给出涵道风扇转子进口气流角周向平均值沿径向的分布结果。可以看出,倾转角度对涵道风扇进口气流角有一定影响,其主要的的影响区域集中在70%~100%叶高区域。在90%叶高处最大角度差异为 4° 。说明,倾转角度会对风扇转子的进气角度产生一定的影响。

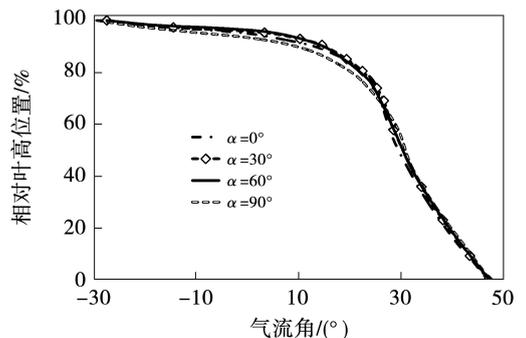


图10 风扇进口气流角径向分布

Fig.10 Radial distribution of flow angle at fan inlet

图11~图14给出涵道风扇不同倾转角度下沿流向的切面绝对速度云图。可以看出,在 $V_0 = 10 \text{ m/s}$ 的迎风条件下,倾转姿态会对涵道风扇的流动产生明显影响。其中,迎风侧涵道内壁面出现了较为明显的低速区,背风侧涵道内壁面流动情况良好。同时,倾转姿态下涵道唇口附近的速度分布已经出现了非对称现象,说明倾转姿态会造成涵道进气畸变。

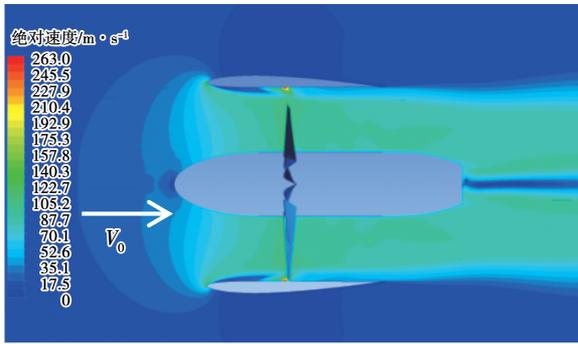


图 11 $\alpha = 0^\circ$ 时涵道风扇绝对速度云图

Fig. 11 Absolute velocity contour of ducted-fan at $\alpha = 0^\circ$

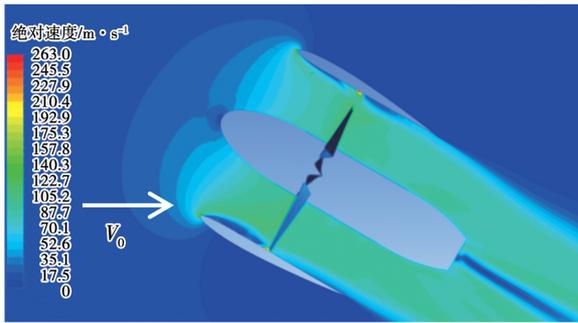


图 12 $\alpha = 30^\circ$ 时涵道风扇绝对速度云图

Fig. 12 Absolute velocity contour of ducted-fan at $\alpha = 30^\circ$

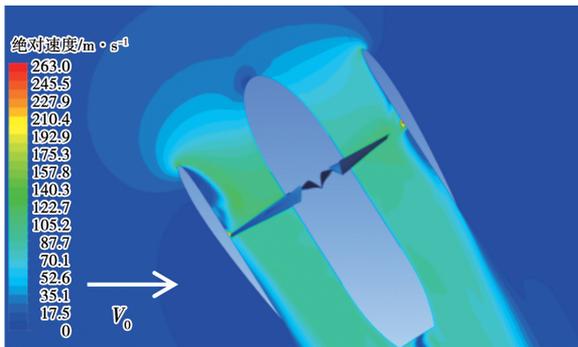


图 13 $\alpha = 60^\circ$ 时涵道风扇绝对速度云图

Fig. 13 Absolute velocity contour of ducted-fan at $\alpha = 60^\circ$

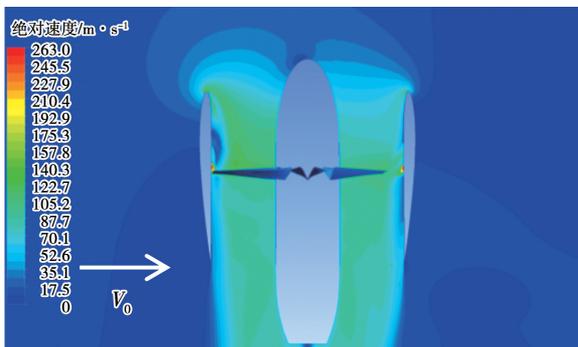


图 14 $\alpha = 90^\circ$ 时涵道风扇绝对速度云图

Fig. 14 Absolute velocity contour of ducted-fan at $\alpha = 90^\circ$

表 5 给出涵道和风扇转子的俯仰力矩。可以看出,在存在来流速度的情况下涵道风扇一旦脱离水平姿态就会产生明显的俯仰力矩,且涵道及风扇转子的俯仰力矩随倾转角度 α 的增大呈现先增加后减小的趋势,在 $\alpha = 60^\circ$ 时最大。风扇转子俯仰力矩在下降过程中下降幅度较小,涵道俯仰力矩在下降过程中下降幅度较大。

表 5 涵道风扇气动扭矩 ($N \cdot m$)

Tab. 5 Aerodynamic torque of ducted-fan ($N \cdot m$)

$\alpha / (^\circ)$	涵道俯仰力矩	风扇俯仰力矩	总俯仰力矩
0	0	0	0
30	141.4	98.2	239.6
60	281.5	168.2	449.7
90	193.9	167.1	361.0

2.2 垂直姿态特性分析

针对垂直姿态,对涵道风扇在 $V_0 = 0, 5, 10, 15$ 和 20 m/s 侧风速度条件下的特性进行了研究。图 15 给出垂直姿态下涵道风扇特性随侧风速度的变化规律。从图中可以看出, V_0 在 $0 \sim 15 \text{ m/s}$ 范围内,涵道拉力、风扇转子拉力、总拉力以及功率均随着侧风速度的增加呈现出上升趋势;在 V_0 超过 15 m/s 后,呈现逐渐平缓并略微下降的趋势。

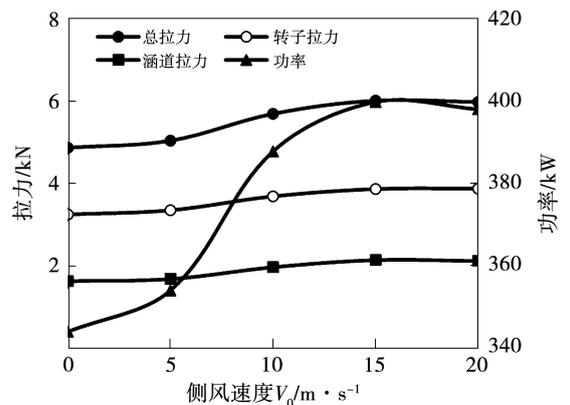


图 15 涵道风扇特性随侧风速度变化规律

Fig. 15 Variation law of ducted-fan characteristics with crosswind velocity

图 16 给出涵道风扇力效以及流量随侧风速度的变化情况。可以看出,二者随侧风速度的变化规律相似, V_0 在 $0 \sim 15 \text{ m/s}$ 范围内,随侧风速度的增加呈增大趋势,在 V_0 超过 15 m/s 后力效和流量均

出现下降趋势。

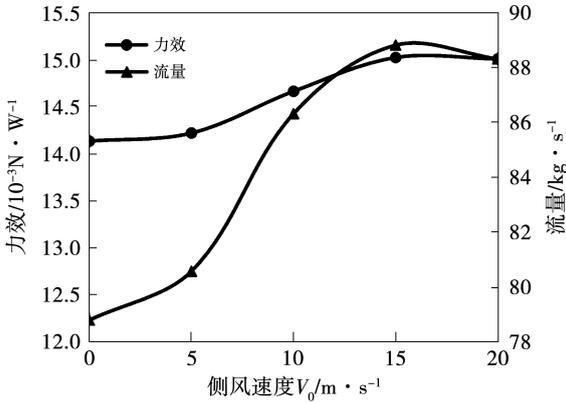


图 16 涵道风扇力效随侧风速度的变化

Fig. 16 Variation of ducted-fan force efficiency with crosswind velocity

表 6 给出涵道风扇气动特性随侧风速度的变化规律,表中数据为相对于 0 m/s 风速时的变化幅度。数据显示,涵道拉力随侧风速度的变化幅度最大,在 $V_0 = 15$ m/s 时较 $V_0 = 0$ m/s 时涵道拉力增加幅度最大达到 34.05%。在不同侧风速度条件下,转子拉力变化幅度与功率变化幅度接近,说明力效的变化主要受涵道拉力的影响。

表 6 垂直状态涵道气动特性随侧风速度的变化规律 (%)

Tab. 6 Variation law of aerodynamic characteristics of ducted-fan with crosswind velocity under vertical attitude (%)

参 数	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
流量	2.30	9.54	12.76	12.07
功率	2.97	12.70	16.28	15.79
涵道拉力	5.60	24.48	34.05	32.55
转子拉力	3.06	13.65	18.72	18.12
总拉力	3.89	17.18	23.71	22.82
力效	0.90	3.98	6.39	6.08

图 17、图 18 给出垂直悬停状态不同侧风速度下迎风侧和背风侧涵道表面静压分布。可以看出,侧风速度对涵道壁面的静压分布有较明显的影响,迎风侧涵道壁面静压在 5 种不同的侧风速度下分布趋势相同,但变化幅度存在区别。在 $V_0 = 0$ 及 5 m/s 条件下,迎风侧涵道壁面静压变化较小,二者分布较为接近;在侧风速度增大至 $V_0 = 10$ m/s 后,迎风侧

涵道壁面前 50% 流向区域有一个较大幅度的下降, $V_0 = 10$ m/s 时下降幅度最大的位置位于唇口附近, V_0 超过 10 m/s 后下降幅度最大点位于约 35% 流向位置处。

背风侧涵道壁面静压在不同侧风速度下的变化趋势与迎风侧不同。在侧风速度增大至 $V_0 = 5$ m/s 后,约 35% 流向区域点内涵道壁面静压有一个较为明显的增加;在侧风速度继续增大至 $V_0 = 20$ m/s 时,该区域内涵道壁面静压的增加幅度较小,即在约流向区域 35% 位置处; $V_0 = 5$ 和 20 m/s 条件下二者背风侧涵道壁面静压分布较为接近。 V_0 在 10 ~ 20 m/s 范围内背风侧涵道壁面静压变化区域主要集中在涵道唇口附近,随着侧风速度增加涵道唇口内流动壁面静压呈增大趋势。

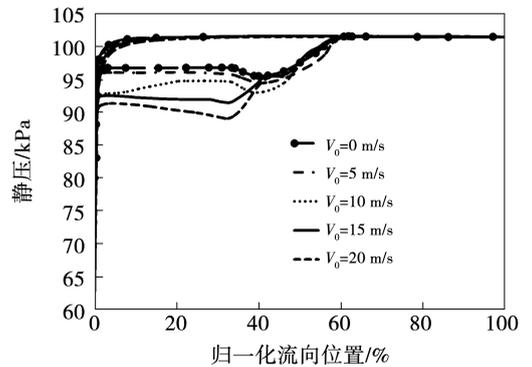


图 17 迎风侧涵道壁面静压分布

Fig. 17 Static pressure distribution on windward side wall of duct

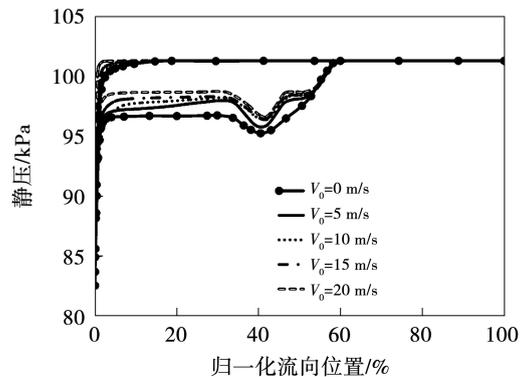


图 18 背风侧涵道壁面静压分布

Fig. 18 Static pressure distribution on leeward side wall of duct

图 19 给出风扇转子进口轴向速度沿叶高的分布。可以看出,侧风对转子进口全叶高范围的轴向

速度分布均有影响,但影响较为明显的区域主要集中在 50% 叶高以上区域。随着侧风速度的增加,70% 叶高以上区域的轴向速度呈先减小后增大的趋势,在 70% 叶高以下区域变化较小,呈小幅度增加趋势。因此说明,侧风速度增大会导致涵道风扇转子约 70% 叶高以下区域轴向速度增大,70% 叶高以上区域轴向速度先减小后增大。

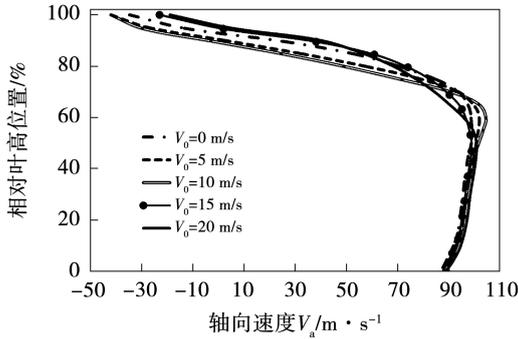


图 19 风扇转子进口轴向速度沿叶高的分布

Fig. 19 Distribution of axial velocity at fan rotor inlet along blade height

图 20 ~ 图 24 给出了涵道风扇沿侧风方向的切面绝对速度云图。可以看出,侧风对涵道风扇进口至转子区域的流场产生较为明显的影响。侧风条件下,涵道风扇进口产生了明显的不对称速度分布。同时,在侧风 V_0 增加至 10 m/s 时,涵道迎风侧内壁面附近出现明显低速区。特别是在 $V_0 = 15$ 和 20 m/s 条件下,迎风侧涵道内壁面已经发生失速。

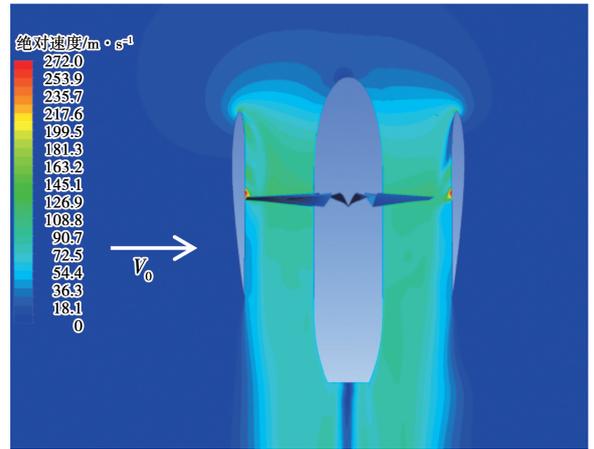


图 21 $V_0 = 5$ m/s 时涵道风扇绝对速度云图
Fig. 21 Absolute velocity contour of ducted-fan at $V_0 = 5$ m/s

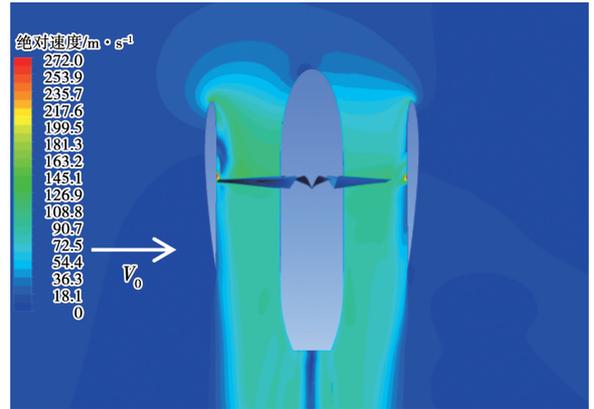


图 22 $V_0 = 10$ m/s 时涵道风扇绝对速度云图
Fig. 22 Absolute velocity contour of ducted-fan at $V_0 = 10$ m/s

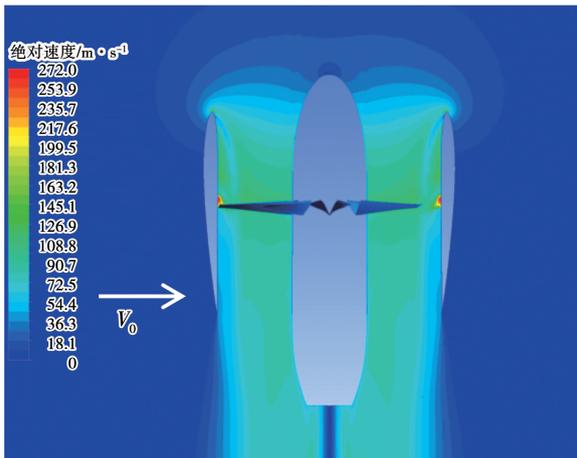


图 20 $V_0 = 0$ m/s 时涵道风扇绝对速度云图
Fig. 20 Absolute velocity contour of ducted-fan at $V_0 = 0$ m/s

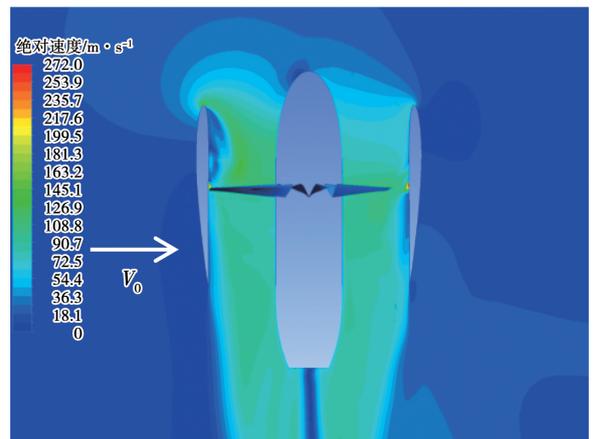


图 23 $V_0 = 15$ m/s 时涵道风扇绝对速度云图
Fig. 23 Absolute velocity contour of ducted-fan at $V_0 = 15$ m/s

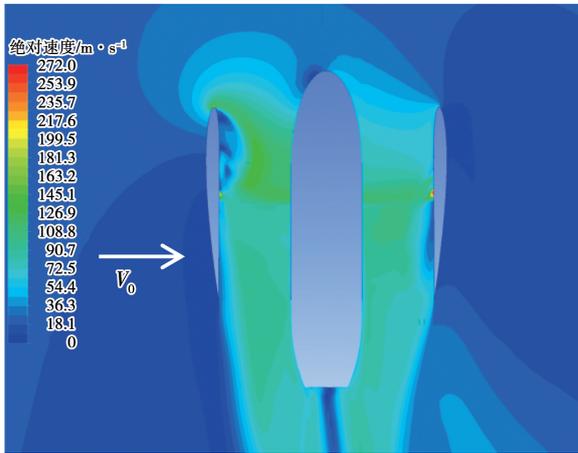


图 24 $V_0 = 20 \text{ m/s}$ 涵道风扇绝对速度云图

Fig. 24 Absolute velocity contour of ducted-fan at $V_0 = 20 \text{ m/s}$

3 结 论

采用三维数值模拟方法详细分析了某涵道风扇不同倾转角度下及垂直状态不同侧风条件下的气动特性,主要结论如下:

(1) 在 10 m/s 的迎风条件下,倾转角度对涵道风扇的气动特性会产生较明显的影响,随着倾转角度 α 的增大,涵道拉力、转子拉力、总拉力、功率以及力效均呈现先增大后减小的趋势,且在 $\alpha = 60^\circ$ 时达到峰值。

(2) 倾转角度对涵道拉力的影响比对风扇转子拉力及功率的影响更为明显,说明倾转角度对唇口附近区域的流动情况影响较为显著。

(3) 垂直姿态下,侧风速度对涵道风扇的影响主要体现在涵道性能的变化,涵道风扇力效的改变主要由涵道性能决定。

(4) 垂直姿态下,侧风会导致涵道风扇转子进口轴向速度重新分布,影响较为明显的区域主要集中在 50% 叶高以上。

参考文献:

[1] KELLERY H L, CHAMPINE R A. Flight operating problems and aerodynamic and performance characteristics of a fixed-wing, tilt-duct, VTOL research aircraft [R]. NASA TN D-1802, Hampton: Langley Research Center, 1963.

[2] TAPSCOTT R J, KELLERY H L. A flight study of the conversion

maneuver of a tilt-duct VTOL aircraft [R]. NASA TN D - 372, Hampton: Langley Research Center, 1960.

- [3] PLATT R J. Static tests of a shrouded and an unshrouded propeller [R]. NACA RM No. L7H25, Hampton: Langley Research Center, 1948.
- [4] TAYLER R T. Experimental investigation of the effects of some shroud design variables on the static thrust characteristics of a small-scale shrouded propeller submerged in a wing [R]. NACA TN - 4126, Hampton: Langley Research Center, 1958.
- [5] GRAY R B, WRIGHT T. Determination of the design parameters for optimum heavily loaded ducted fans [C]. Atlanta: AIAA, 1969.
- [6] BORST H V. A new blade element method for calculating the performance of high and intermediate solidity axial flow fans [R]. NASA-CR-3063, Moffett Field: Ames Research Center, 1978.
- [7] GUERRERO I, LONDENBERG W K, GELHAUSEN P, et al. A powered lift aerodynamic analysis for the design of ducted fan UAVs [C]. San Diego: AIAA, 2003.
- [8] LEE T E. Design and performance of a ducted coaxial rotor in hover and forward flight [D]. State of Michigan: University of Maryland, 2010.
- [9] 徐国华, 王适存. 涵道螺旋桨的滑流理论 [C]. 临潼: 第十届全国直升机年会, 1994.
- XU Guohua, WANG Shicun. Ducted propeller slipstream theory [C]. Lintong: The 10th National Annual Conference of Helicopters, 1994.
- [10] 李建波, 高正. 涵道风扇空气动力学特性分析 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(6): 680 - 684.
- LI Jianbo, GAO Zheng. Aerodynamic characteristics analysis of ducted fan [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(6): 680 - 684.
- [11] 叶坤, 叶正寅, 屈展. 涵道气动优化设计方法 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(8): 1828 - 1835.
- YE Kun, YE Zhengyin, QU Zhan. Aerodynamic optimization method for duct design [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(8): 1828 - 1835.
- [12] 邓阳平, 米百刚, 张言. 涵道风扇气动特性影响因素数值计算研究 [J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(6): 1045 - 1051.
- DENG Yangping, MI Baigang, ZHANG Yan. Research on numerical calculation for aerodynamic characteristics analysis of ducted fan [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(6): 1045 - 1051.
- [13] 李晓华, 郭正, 柳兆伟, 等. 涵道风扇外形参数对气动特性的影响 [J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(4): 28 - 33.
- LI Xiaohua, GUO Zheng, LIU Zhaowei, et al. Influence of ducted fan profile parameters on aerodynamic characteristics [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(4):

28 - 33.

- [14] 姬乐强, 李建波, 方毅. 涵道风扇气动特性及其参数优化设计[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 245 - 251.

Ji Leqiang, Li Jianbo, Fang Yi. The aerodynamic characteristics and parameter optimization design of ducted fan [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(9): 245 - 251.

- [15] 王海鹏. 涵道螺旋桨在轴流状态的气动特性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

Wang Haipeng. Analysis of the axes-symmetry aerodynamic characteristics of ducted propeller [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.

- [16] 王强. 涵道风扇无人机气动性能数值模拟[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.

Wang Qiang. Numerical simulation of aerodynamic performance of the ducted fan UAV [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.

- [17] 孔庆旗. 涵道风扇系统气动特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

Kong Qingqi. Research on aerodynamic characteristics of ducted fan system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

- [18] AKTURK A, SHAVALIKUL A, CAMCI C. PIV measurements and computational study of a 5-inch ducted fan for V/STOL UAV applications [C]. Orlando: AIAA, 2009.

- [19] DENG S H, WANG S W, ZHANG Z. Aerodynamic performance assessment of a ducted fan UAV for VTOL applications [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 103: 105895.

- [20] MORT K W. Performance characteristics of a 4-foot-diameter ducted fan at zero angle of attack for several fan blade angles [R]. NASA TN D-3122, Moffett Field: Ames Research Center, 1965.

(丛敏编辑)

(上接第 30 页)

- [20] 张成烽, 张国臣, 燕阳, 等. 叶尖间隙改型对跨声速压气机性能影响数值研究 [C] // 中国航空学会. 第十届中国航空学会青年科技论坛论文集. 北京: 科学普及出版社, 2022.

Zhang Chengfeng, Zhang Guochen, Yan Yang, et al. Numerical study on the effect of tip clearance modification on the performance of transonic compressor [C] // Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Proceedings of the 10th China Aviation Society Youth Science and Technology Forum. Beijing: Popular Science Press, 2022.

- [21] REID L, MOORE R D. Design and overall performance of four highly-loaded, high-speed inlet stages for an advanced high-pressure-ratio core compressor [R]. NASA, 1978 - TP - 1337.

- [22] REID L, MOORE R D. Performance of single-stage axial-flow tra-

nsonic compressor with rotor and stator aspect ratios of 1.19 and 1.26, respectively, and with design pressure ratio of 1.82 [R]. NASA, 1978 - TP - 1338.

- [23] 王子维, 范召林, 江雄, 等. 用于压气机流动计算的 3 种模型比较 [J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1195 - 1206.

Wang Ziwei, Fan Shaolin, Jiang Xiong, et al. Comparison among three models for compressor internal flow [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1195 - 1206.

- [24] HUNT J C R, WRAY A A, MOIN P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows [J]. Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases, 2: Proceedings of the 1988 Summer Program, 1988, 89(24555): 193 - 208.

(刘颖编辑)