

前/后置螺旋桨对涡桨发动机性能影响的整机试验

韦宇卿¹, 郭峰¹, 朱剑锋¹, 李伟^{1,2}, 黄兴²

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102;

2. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 基于一款 15 kW 涡桨发动机, 构建了带偏置进气道的前/后置螺旋桨整机试验台, 探究了前/后置螺旋桨流动特性对涡桨发动机性能的影响规律。研究表明: 随着燃气涡轮转速的增加, 螺旋桨滑流增压效果增强、进气道内气流损失增加, 其中相对换算转速 64% 及 88% 状态滑流增压效果分别为 0.35% 及 0.7%, 综合表现为前置状态下螺旋桨/进气道的综合总压恢复系数基本维持在 100%; 受制于前置螺旋桨滑流增压效果与外置传输轴功率损失的综合影响, 在相同燃气涡轮转速下, 前/后置状态的发动机拉力基本一致, 但后置状态的螺旋桨转速增加 2.8%~4%、出口排气温度增加 11~22 °C; 相比于后置状态正上方压力相对偏高的图谱分布, 前置状态下气流在进气道内沿螺旋桨旋转方向往右下角方向进行堆积, 进气道出口呈现右下角压力高、左上角压力低的图谱分布, 总压畸变指数有所降低。

关 键 词: 螺旋桨; 滑流; 涡桨发动机; 进气道; 压力畸变

中图分类号: V211.7

文献标志码: A

Experiment on influence of front/after-mounted propeller on turboprop engine performance

WEI Yuqing¹, GUO Feng¹, ZHU Jianfeng¹, LI Wei^{1,2}, HUANG Xing²

(1. School of Aerospace Engineering,

Xiamen University, Xiamen Fujian 361102, China;

2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: Based on a 15 kW turboprop engine, a test rig for a biased inlet adopting a front/after-mounted propeller configuration was built. And the influence of the front/after-mounted propeller configurations on the performance of turboprop engine was investigated. The results showed that: with the increase of the gas turbine speed, the pressurization effect of the propeller slipstream was enhanced and the airflow loss in the inlet duct increased. The pressurization effect of propeller slipstream was 0.35% and 0.7% at the relative corrected speed of 64% and 88%, respectively. It showed that when adopting the front-mounted configuration, the total pressure recovery coefficient of propeller/intake duct system was basically maintained at 100%; limited by both the slipstream pressurization effect from the front-mounted propeller and the power loss of

收稿日期: 2021-10-04

基金项目: 中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2018-017)

作者简介: 韦宇卿(1995—), 男, 硕士生, 研究领域为飞发一体化设计。E-mail: 34720191151095@stu.xmu.edu.cn

引用格式: 韦宇卿, 郭峰, 朱剑锋, 等. 前/后置螺旋桨对涡桨发动机性能影响的整机试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(1): 165-172.

WEI Yuqing, GUO Feng, ZHU Jianfeng, et al. Experiment on influence of front/after-mounted propeller on turboprop engine performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 165-172.

the external transmission shaft, the engine pull was almost the same at the same gas turbine speed no matter the propeller was mounted front or rear, but the speed of the propeller in the rear position increased by 2.8%—4%, and the outlet exhaust temperature increased by 11—22 °C; For the after-mounted propeller configuration, the distortion pattern was characterized by a relatively high pressure distribution at its upper part. In contrast, for the front-mounted configuration, since the airflow accumulated at the lower right corner along the direction of the propeller rotation, the distortion pattern at the outlet of inlet duct showed a distribution of high pressure in the lower right corner and low pressure in the upper left corner. And the total pressure distortion index decreased.

Key words: propeller; slipstream; turboprop engine; inlet; pressure distortion

涡桨发动机具有耗油率低、起降性能优异等优点,目前主要作为支线飞机、通用航空飞机的推进动力^[1-2]。现代涡桨发动机一个典型特点是采用燃气涡轮与动力涡轮分轴旋转的总体结构方式,螺旋桨/动力涡轮的转速通过调节油门杆和桨叶桨距角进行综合控制。

对于典型的双转子涡桨发动机,飞行工况的变化或桨距角的调节过程中,为维持桨叶转速不变,桨叶所需的功率随之变化;发动机为保证动力涡轮输出功率与桨叶所需功率匹配,燃气发生器油门杆及转速将相应地进行调整,发动机进口压力、流量等参数随之变化。此外,由于螺旋桨滑流的作用,进气道出口截面流场不均匀分布,不同桨距角情况下的螺旋桨/进气道流动特征的不同,进而影响发动机性能以及稳定性。针对螺旋桨/进气道/发动机之间的气动及性能耦合特性,国内外研究人员开展相关的试验及数值仿真研究^[3-8],典型工作有,国外佐治亚理工学院 Pakmehr 等^[9]基于最大输出功率 6 kW 的 JetCat SPT5 涡桨发动机,建立了变距螺旋桨的双轴涡桨发动机整机试验模型,研究了螺旋桨/发动机的非设计点动态特性;ITP(Industria de Turbo Propulsores)公司 Lopez-Diez 等^[10]利用试验及数值仿真方法对 A400M 的螺旋桨与下颌环绕式进气道的气动影响进行了研究,得到了有/无螺旋桨及下颌式型面对发动机进口截面流动特性的影响规律;空中客车公司 Ruiz-Calavera 等^[11]在高速风洞中对带有螺旋桨的高偏置涡桨发动机进气道模型进行了试验,获得了螺旋桨对进气道流动特性的影响规律。国内罗天一等^[12]建立了涡桨推进系统整体推进性能的数学模型,获得了多变量涡桨发动机的稳态/过渡态推力及耗油率等特性;田超等^[13]建立了发动机燃油调节和螺旋桨一体化控制模型,实现了涡桨发动机

功率超调的抑制;刘婧妮等^[14]建立了一种先进涡桨发动机总体性能设计方法,仿真得到了设计及非设计状态的发动机总体性能参数;周诗睿、潘鑫智、李博等^[15-17]针对螺旋桨/短舱/进气道构型的内外流进行了数值仿真,阐述了螺旋桨滑流以及进气道之间的气动干扰机制。

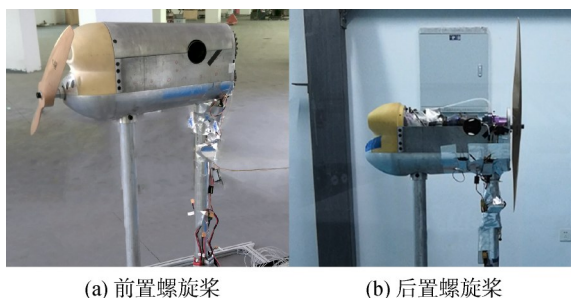
上述研究工作有利地支撑了涡桨发动机总体性能改进及控制规律优化设计,但其研究对象更多为特定的螺旋桨/进气道/发动机构型方案。尽管前置/后置螺旋桨的构型、偏置进气道的尺寸受飞行器/涡桨推进系统综合确定,但充分了解前置/后置螺旋桨构型对涡桨发动机性能的影响规律,将为涡桨发动机整机构型的确定提供数据支撑。此外,考虑到不同桨距角螺旋桨、偏置进气道与动力涡轮式-涡桨发动机之间的复杂气动及性能耦合特性,单纯的螺旋桨/进气道等部件试验可能难以得到整个推进系统的特征规律。

基于以上认识,本文基于一款小型的 15 kW 涡桨发动机,构建了带偏置进气道的前/后置螺旋桨整机试验台,开展了不同工况的整机试验研究,探究了前/后置螺旋桨流动特性对涡桨发动机性能及进气道压力分布特性的影响规律,为未来新一代涡桨发动机的整机构型确定及优化设计提供有益的数据支持和缩比验证平台支撑。

1 试验模型及测量系统

为了针对性研究前/后置螺旋桨特性对涡桨发动机性能的影响,本文基于双转子 JetCat SPT15 涡桨发动机,分别构建了前/后置的螺旋桨/进气道/发动机整机试验台,如图 1 所示。

由于该型涡桨发动机为动力涡轮功率后输出结构形式,本文引入外置传动轴的方式进行前置螺旋桨设计,外置传动轴与发动机后置输出轴之



(a) 前置螺旋桨

(b) 后置螺旋桨

图1 前/后置螺旋桨整机试验台

Fig.1 A front/after-mounted propeller test-bed

间通过齿轮联接,齿轮及外置传动轴包裹在短舱内部,如图2所示。后置螺旋桨方案则直接将螺旋桨安装于发动机后置输出轴,进气道、短舱与前置方案保持一致。试验系统包括JetCat SPT15涡桨发动机、两叶螺旋桨、偏置进气道、短舱、安装台架以及数据采集系统等。其中JetCat SPT15涡桨发动机燃气涡轮转子最大转速为125 000 r/min,动力涡轮最大输出转速为6 000 r/min,最大输出功率为15 kW。两组木质螺旋桨的桨距角分别为 10° 及 18° 桨距角,桨盘直径为0.84 m,顺流向从前往后看,螺旋桨旋转方向为逆时针方向。在保证安装空间基础上,结合螺旋桨及发动机的流动特性,匹配设计了偏置进气道及短舱,其型面气动优化工作将在后续研究中给出。短舱整体采用“倒立”方式安装在底座上,通过中空支撑杆进行油路及数据连接线的布置;试验台底座分为动架与静架,其通过滑轨连接,并在动架前部安装推力传感器以测量发动机拉力/推力。

主要测量参数为发动机拉力/推力、转速及温度,进气道沿程静压及出口总压分布。其中拉力/推力采用SBT970TX型号图显式推拉力传感器进行采集,采样频率为50 Hz。燃气发生器及动

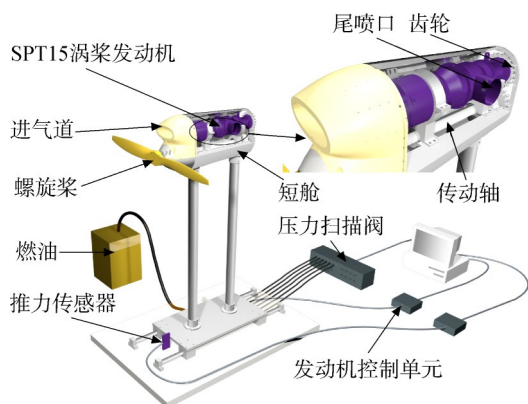


图2 试验系统

Fig.2 Test system

力涡轮转速由发动机自带转速传感器进行采集,采样频率为10 Hz。压力数据采用Tyco Electronics Connectivity公司的压力扫描阀,最大采样频率为500 Hz,量程为 $\pm 34\,475$ Pa,精度为 $\pm 0.05\%$ 。其中出口总压测点分布为“*”形,6排总计24个测点;沿程静压为3排,并将进气道进口截面中线的一排标号为A、进气道内壁面与中轴面相交于顶部的一排标号为B、入口右侧壁面的一排标号为C,每排各4点总计12个测点,具体压力测点分布如图3所示。

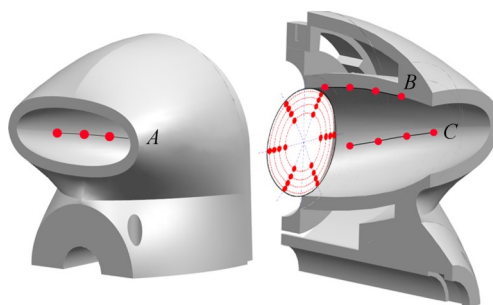


图3 进气道沿程静压及出口截面总压测点分布

Fig.3 Distribution of measuring points for static pressure along the inlet and total pressure at the outlet section

2 总体性能分析

基于上述试验平台,开展了燃气涡轮转速 n 分别为80 000、90 000、100 000及110 000 r/min的桨/进/发匹配试验,其相对换算转速 n_{cor} 分别为64%、72%、80%及88%。前置螺旋桨状态下,螺旋桨桨距角 θ 为 10° 及 18° ,后置螺旋桨状态下桨距角 θ 为 10° 。基于上述试验状态,本文首先分析了前/后置螺旋桨对发动机总体性能参数的影响规律。

图4即给出了螺旋桨拉力随燃气涡轮转速变化图。由图可知,随着燃气涡轮转速的增加,四个状态下桨叶拉力逐渐增加;在相同的燃气发生器转速状态下, 10° 桨距角对应的前/后置螺旋桨拉力基本一致;在相同的前置螺旋桨状态下,不同桨距角对应的桨叶拉力有着一定的差异,其中相对换算转速 $n_{cor}=80\%$ 状态下,桨距角 10° 状态的拉力相比于 18° 有着约8%的增加。考虑到试验过程中的拉力测量精度及发动机运转过程中的转速轻微波动影响,结合不同燃气涡轮转速下的变化规律可基本认为:在本文研究的试验状态下,前/后置螺旋桨对桨叶拉力的影响较小,桨叶拉力主要受燃气涡轮转速状态决定。

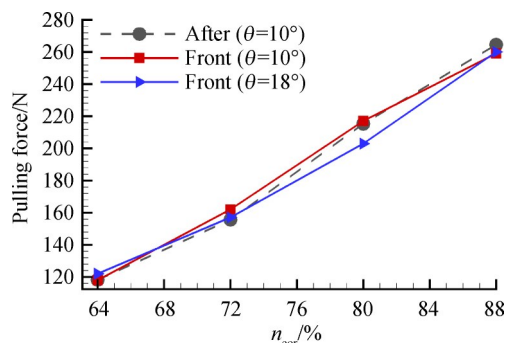


图 4 螺旋桨拉力随燃气涡轮相对换算转速变化

Fig.4 Propeller force versus gas turbine relative corrected speed

不同于桨叶拉力的变化规律,在前/后置桨叶不同的桨距角状态下,螺旋桨转速则表现了较为明显的差异,图 5 即给出了不同状态下螺旋桨转速随燃气涡轮转速的变化规律。从图中可知:随着燃气涡轮转速的增加,螺旋桨转速也随之增加;在相同燃气涡轮转速下,螺旋桨转速随桨距角的增大而减小。其主要原因是随着桨距角增大,螺旋桨各径向截面叶素攻角增加,相同螺旋桨转速下螺旋桨对气流做功能力增强;在相同动力涡轮输出功率情况下,螺旋桨转速需相应地下降。相比于后置螺旋桨状态,前置螺旋桨无滑流影响状态下,相同燃气涡轮转速下,螺旋桨转速略有降低,其中燃气涡轮相对换算转速 $n_{cor}=64\%$ 时螺旋桨相对转速降低约 4%,88% 状态下转速降低约 2.8%。其可能原因是,本文采用外置传动轴的方式进行前置螺旋桨设计,外置传动轴的引入将产生一定的功率损失,因此前置螺旋桨状态桨叶转速有着一定程度的降低。

而随着燃气涡轮转速的变化,此时发动机出口排气温度则有着一定的区别,如图 6 所示。从图中可以看出,随着燃气涡轮转速的增加,各状态

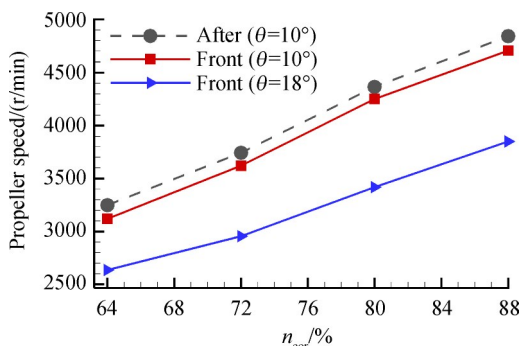


图 5 螺旋桨转速随发动机燃气涡轮相对换算转速变化

Fig.5 Propeller speed versus gas turbine relative corrected speed

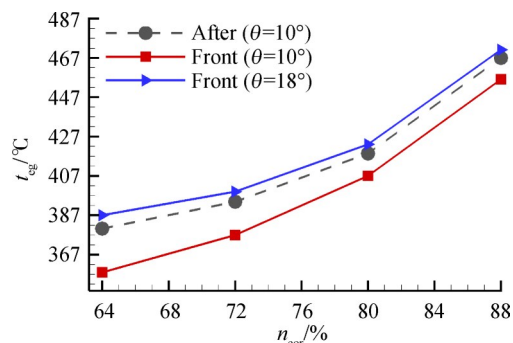


图 6 排气温度随燃气涡轮相对换算转速变化

Fig.6 EGT versus gas turbine relative corrected speed

下出口排气温度(exhaust gas temperature, EGT, 量符号记为 t_{eg})均有所增加。在相同燃气涡轮转速下,由于桨距角的增加,桨叶各径向截面叶素攻角增加,桨叶负载增强,燃气涡轮出口背压即动力涡轮进口压力增强,可理解为核心机等效出口面积减小,相同燃气涡轮转速下排气温度升高。相比于后置螺旋桨状态,在前置螺旋桨滑流的作用下,发动机进口气流总压可能有着一定程度的增加,进气道总压恢复系数增加,相同燃气涡轮转速下发动机 EGT 有着一定的下降,其中燃气涡轮相对换算转速 $n_{cor}=64\%$ 时温度下降 22°C ,88% 状态下温度下降约 11°C 。

不同桨距角及燃气涡轮转速状态下发动机推力及温度的变化原因可结合图 7 进行进一步分析,图 7 即反映了前/后置螺旋桨状态下进气道出口截面总压恢复系数随燃气涡轮转速变化,其中总压恢复系数定义为进气道出口截面总压与来流总压之比,综合衡量了螺旋桨的滑流增压效果及进气道的流动损失,图中 Δ_1 、 Δ_2 分别表示相对换算转速 $n_{cor}=72\%$ 及 80% 时螺旋桨前后置状态间的总压恢复系数差异。从图中可以看出,前置螺

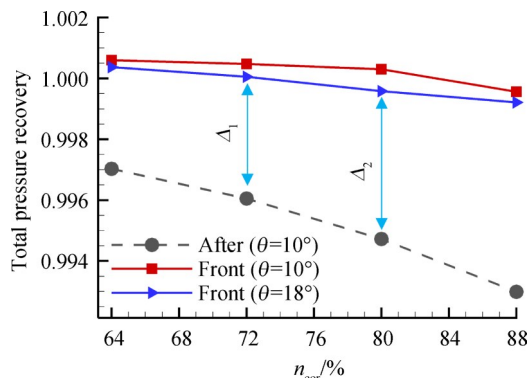


图 7 总压恢复系数随燃气轮机相对换算转速变化

Fig.7 Inlet total pressure recovery versus gas turbine relative corrected speed

旋桨状态下,进气道出口总压较后置螺旋桨状态有着明显的增加,其主要原因来自于螺旋桨对于下游气体的增压效果。也正因为螺旋桨的增压效果,相对换算转速 $n_{\text{cor}}=64\%$ 及 72% 状态下,总压恢复系数均大于 1.0。而随着燃气涡轮转速的增加,发动机流量逐渐增加,进气道内气流流速逐渐增加,由此带来的流动损失增加,总压恢复系数下降幅度逐渐增强,如图中后置螺旋桨状态。而前置螺旋桨状态下,燃气涡轮转速的增加将使得螺旋桨转速的增加,螺旋桨增压效果逐渐增强,在螺旋桨增压效果逐渐增强与进气道流动损失逐渐增加这两者的相互作用下,该状态下的总压恢复系数随转速的变化相对平缓。总体而言, 10° 桨距角状态下,前后置螺旋桨状态下的总压恢复系数之间的差异逐渐由 64% 转速状态的约 0.35% 增加至 88% 转速状态的 0.7% 。值得补充说明的是,尽管 0.35% 的增压效果较小,该增压效果的绝对值为 354 Pa ,明显高于压力扫描阀的测量误差 $\pm 17\text{ Pa}$ 。此外,本文试验结果来自于同一标准的不同状态,结果误差不影响总体变化趋势,故作者认为 0.35% 的增压效果具有一定的可信度。

综上所述,尽管前置螺旋桨有着滑流增压效果,但由于前置螺旋桨外置传输轴带来的功率损失问题,最终表现为在相同燃气涡轮转速下,前/后置状态下发动机拉力基本一致,后置状态的螺旋桨转速增加 $2.8\%\sim 4\%$ 、出口排气温度增加 $11\sim 22^\circ\text{C}$ 。

3 压力分布特性分析

在前/后置螺旋桨对发动机总体性能的基础上,本文针对进气道压力分布特性进行了分析。图 8 即给出了进气道上侧沿程静压分布随燃气涡轮转速的变化,图中 p/p_0 表示进气道沿程静压 p 和大气压力 p_0 的比值, X/X_0 表示测点在进气道中的轴向位置 X 和进气道长度 X_0 的比值,其中测点位置如图 3 中 B 所示。从图中可以看出,后置螺旋桨状态下,相对换算转速 64% 及 88% 状态下,进气道沿程静压均基本与大气压保持一致,受燃气涡轮状态及测点位置的影响较弱。而前置螺旋桨状态下,随着燃气涡轮转速的增加,沿程静压曲线整体向下移动,均呈现中间静压高、进出口静压相对偏低的现象。总体而言,在本文研究的简易进气道中,无螺旋桨滑流影响的后置螺旋桨状

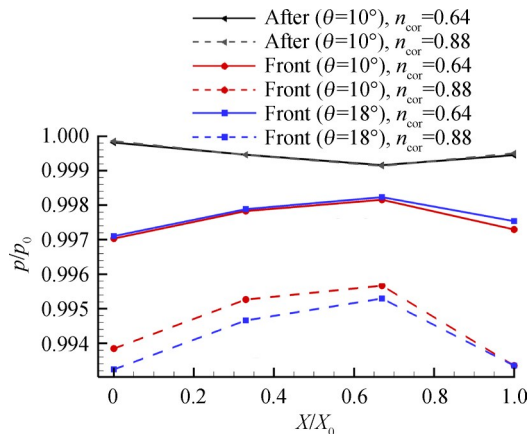


图 8 进气道沿程静压分布随燃气涡轮相对换算转速变化

Fig.8 Inlet static pressure distribution versus gas turbine relative corrected speed

态下,发动机抽吸状态的变化对进气道内静压分布影响不明显,进气道内的沿程静压分布特性主要受到螺旋桨滑流的影响。

在进气道沿程静压分布的基础上,图 9 即给出了后置螺旋桨状态的进气道出口截面总压图谱。从图中可以看出,受制于进气道型面的影响,不同燃气涡轮转速下,总压分布呈现正上方压力相对偏高现象。而随着燃气涡轮转速的增大,高压区总压幅值有所增大,而低压区的总压幅值则有所下降,平均总压恢复系数逐渐由 $n_{\text{cor}}=64\%$ 的 99.7% 降低至 $n_{\text{cor}}=88\%$ 的 99.3% 。

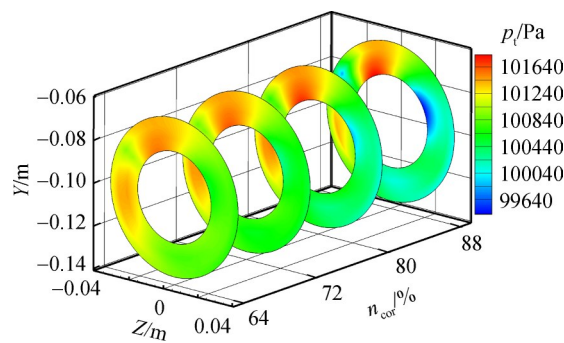


图 9 总压分布(后置螺旋桨、桨距角为 10°)

Fig.9 Total pressure distribution
(after-mounted propeller, 10° pitch angle)

图 10~图 11 即前置螺旋桨状态下 10° 及 18° 桨距角,进气道出口截面的总压图谱。由图可知,与后置螺旋桨状态相比,由于螺旋桨滑流的影响,且进气道为偏置型,气流在进气道内沿逆时针螺旋桨旋转方向,向进气道出口右下角进行堆积,形成了进气道出口截面气流的不均匀分布,呈现出

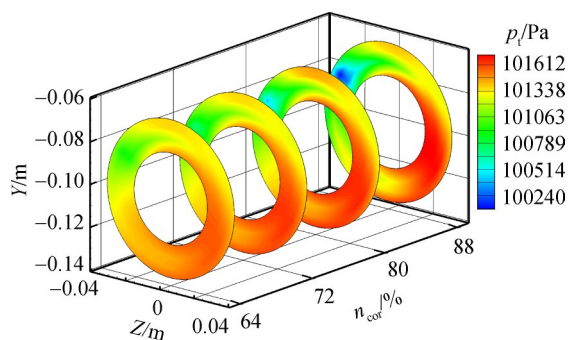


图 10 总压分布(前置螺旋桨、桨距角为 10°)

Fig.10 Total pressure distribution
(front-mounted propeller, 10° pitch angle)

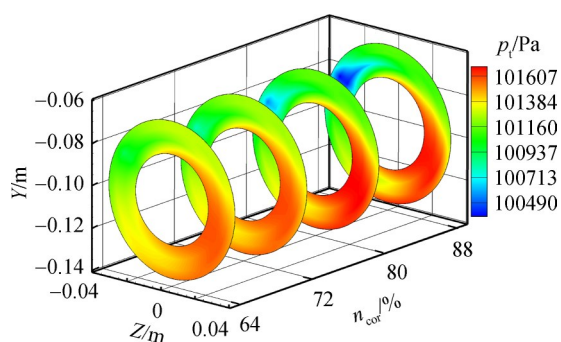


图 11 总压分布(前置螺旋桨、桨距角为 18°)

Fig.11 Total pressure distribution
(front-monnted propeller, 18° pitch angle)

明显的高压区与低压区。而随着燃气涡轮转速的增大,高压及低压区域面积均逐渐扩大,且高压区幅值逐渐增加,低压区幅值逐渐减小。该现象进一步表明,高压区幅值的增加主要来源于螺旋桨增压效果的增强,而低压区幅值的降低来源于进气道总压损失的增加。

为了进一步量化分析上述压力图谱,引入了总压畸变指数 $D_{c,60}$ ^[18]:

$$D_{c,60} = \frac{p_{t,ave} - p_{t,60,sector}}{p_{t,ave} - p_{ave}}$$

其中 $p_{t,ave}$ 为发动机进口气动截面的平均总压, $p_{t,60,sector}$ 为平均总压最小的 60° 扇区的平均总压, p_{ave} 为发动机进口截面的平均静压。

由图 12 给出的不同状态下 $D_{c,60}$ 随燃气涡轮转速变化可知:由于前置螺旋桨的周期性旋转给气流一个切向速度,将给螺旋桨下游气流带来较为明显的滑流特性,滑流的切向流动特性在进气道内受侧壁阻碍,因此气流在进气道内沿螺旋桨旋转方向往进气道出口右下角方向进行堆积,进而导致发动机进口截面产生总压分布不均匀等现

象,前/后置状态下进气道内流动特性存在明显的差异,相同燃气涡轮转速下后置状态对应的畸变指数 $D_{c,60}$ 相对更高。而随着发动机燃气涡轮转速的增大,发动机进口的平均流速增大, $D_{c,60}$ 计算公式中分母所代表的平均动压头急剧增大;而分子平均总压与 60° 扇区内最小平均总压的差值变化相对较小,因此前/后置螺旋桨状态下进气道出口截面 $D_{c,60}$ 均呈现逐渐减小趋势。此外,前置螺旋桨状态下,随桨距角的增大,相同燃气涡轮转速下,进气道内气流向一侧堆积效应逐渐增强,进气道出口压力分布不均匀程度增加,畸变指数 $D_{c,60}$ 略微上升。

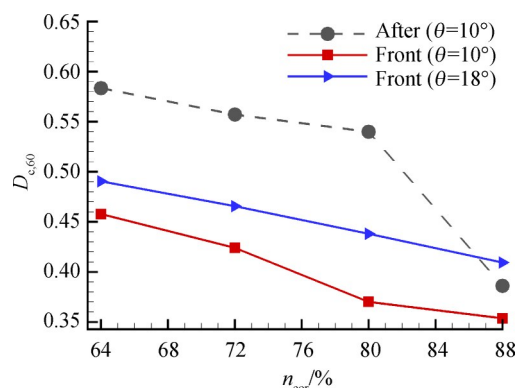
图 12 $D_{c,60}$ 随燃气涡轮相对换算转速变化

Fig.12 $D_{c,60}$ versus gas turbine relative corrected speed
at different states

总体而言,后置状态下进气道出口正上方压力相对偏高,而受制于前置螺旋桨滑流的作用,气流在进气道内沿螺旋桨旋转方向往右下角方向进行堆积,前置螺旋桨状态下进气道出口呈现右下角压力高、左上角压力低的图谱分布,对应的总压畸变指数 $D_{c,60}$ 有所降低。

4 结 论

本文采用整机试验的方式,探究了前/后置螺旋桨流动特性对涡桨发动机性能及进气道压力分布特性的影响规律,主要结论如下:

1) 随着燃气涡轮转速的增加,螺旋桨滑流增压效果增强,进气道内气流损失增加,其中相对换算转速 64% 及 88% 状态滑流增压效果分别为 0.35% 及 0.7%,综合表现为前置状态下螺旋桨/进气道综合总压恢复系数基本维持在 100%。

2) 受制于前置螺旋桨滑流增压效果与外置传输轴功率损失的综合影响,在相同燃气涡轮转速下,前/后置状态的发动机拉力基本一致,但后

置状态的螺旋桨转速增加 2.8%~4%、出口排气温度增加 11~22℃。

3) 相比于后置状态正上方压力相对偏高的图谱分布,前置状态下气流在进气道内沿螺旋桨旋转方向往右下角方向进行堆积,进气道出口呈现右下角压力高、左上角压力低的图谱分布,对应的总压畸变指数 $D_{c,60}$ 有所降低。

本文结论来源于特定的涡桨发动机及进气道,试验结果的普适性相对较差,后续将开展不同进气道类型的桨发匹配试验,进一步加深前/后置螺旋桨对涡桨发动机性能影响的认识。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周辉华. 国外涡桨发动机的发展[J]. 航空科学技术, 2013, 1: 18-22.
ZHOU Huihua. The development prospect of turbo-propeller engines[J]. Aeronautical Science and Technology, 2013, 1:18-22. (in Chinese)
- [3] 夏天乾. 可变桨距微型涡桨发动机控制系统设计与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.
XIA Tianqian. Research on control system design and experiment of a micro turboprop engine with variable pitch[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [4] ALEXIOU A, FRANTZIS C, ARETAKIS N, et al. Contra-rotating propeller modelling for open rotor engine performance simulations[R]. ASME Paper GT2012-69232, 2016.
- [5] SILVA V T, BRINGHENTI C, TOMITA J T, et al. A propeller model for steady-state and transient performance prediction of turboprop and counter-rotating open rotor engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(7):071201.1-071201.13.
- [6] 温占永, 罗洋. 中空长航时无人机恒速螺旋桨与发动机匹配研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5):672-678.
WEN Zhanyong, LUO Yang. Study on matching constant speed propeller for piston engine on MALE UAV[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5):672-678. (in Chinese)
- [7] 史永运. 螺旋桨动力系统桨发匹配技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学. 2017.
SHI Yongyun. Research on prop-engine cooperation technology of propeller power system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [8] 田超. 航空涡桨发动机建模与控制的仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
TIAN Chao. Simulation research on modeling and control of aero turboprop engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [9] PAKMEHR M, FITZGERALD N, FERON E, et al. Physics-based dynamic modeling of a turboshaft engine driving a variable pitch propeller[J]. Journal of Propulsion and Power, 2016, 32(1):646-658.
- [10] LOPEZ - DIEZ A, RUIZ - CALAVERA L, CASTILLO - CALVO J, et al. Front end optimization of high speed turboprop engines[R]. AIAA 2005-4204, 2005.
- [11] RUIZ-CALAVERA L, FUNES-SEBASTIAN D, PERDONES-DIAZ D. Powered model wind tunnel tests of a high-offset subsonic turboprop air intake[R]. AIAA 2010-6502, 2010.
- [12] 罗天一, 单鹏, 孟斐, 等. 螺旋桨-自由涡轮涡桨发动机稳态/过渡态数值模拟[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5):1176-1182
LUO Tianyi, SHAN Peng, MENG Fei, et al. Steady - and transient - state numerical simulation of turboprop engine of propeller-free-turbine types[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5):1176-1182. (in Chinese)
- [13] 田超, 黄向华, 邓志伟. 涡轮螺旋桨发动机建模与控制仿真[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11):2599-2605.
TIAN Chao, HUANG Xianghua, DENG Zhiwei. Modeling and simulation research of turboprop engine control technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11):2599-2605. (in Chinese)
- [14] 刘婧妮. 先进涡轴/涡桨发动机总体性能设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
LIU Jingni. Research of the advanced turboshaft/turboprop engine performance design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [15] 周诗睿, 李博, 周杨, 等. 螺旋桨滑流对发动机进气道气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6):1322-1333.
ZHOU Shirui, LI Bo, ZHOU Yang, et al. Aerodynamic performance influence of propeller slipstream on engine intake [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6):1322-1333. (in Chinese)
- [16] 潘鑫智. 螺旋桨与发动机短舱/进气道的气动影响研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
PAN Xinzhi. Research on aerodynamic interference between propeller and engine nacelle/intake[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [17] 李博, 梁德旺, 黄国平. 基于等效盘模型的滑流对涡桨飞机气动性能的影响[J]. 航空学报, 2008, 29(4):845-852.
LI Bo, LIANG Dewang, HUANG Guoping. Propeller

- slipstream effects on aerodynamic performance of turbo-prop airplane based on equivalent actuator disk model[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29 (4): 845-852. (in Chinese)
- [18] 靖建朋, 郭荣伟. 弹用 S 弯进气道气动性能试验[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(9): 2085-2090.
- JING Jianpeng, GUO Rongwei. Experimental investigation of pneumatic characteristics for S-shaped inlet in missiles[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24 (9): 2085-2090. (in Chinese)
- (编辑: 张 雪)