

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.03.015

APU 风车启动中压气机特性计算与分析

严春晨¹, 朱珈驹², 李传鹏²

(1. 中国航发控制系统研究所试验工程部, 无锡 214063; 2. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 以某离心压气机为研究对象, 数值计算离心压气机风车工作流动特点, 分析了工作叶轮叶片受力情况、探讨了 APU 风车点火转速存在上限值的成因。研究表明, 采用等转速特性线插值获得风车状态的流量、压比和温比的精度和置信度是可取的; 后弯叶片是冲击气流吹转离心压气机的主要受力面, 工作叶轮在 5% 设计转速 (Nd) 以下对外输出力矩, 辅助涡轮部件提升 APU 转子转速; 转速达 15%Nd 后, 工作叶轮恢复对气流做功, 发挥泵气增压功能, 气流流量、压力得到提升; 出口流量相对值随飞行条件和压气机转速变化规律有助于 APU 空中点火转速存在上限值的理解。

关键词: 离心压气机; 风车特性; 风车起动; 数值模拟

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)03-0435-07

Numerical Analysis of a Centrifugal Compressor in APU Windmill

YAN Chunchen¹, ZHU Jiayu², LI Chuanpeng²

(1. Test Engineering Department, AECC Aero-engine Control System Institute, Wuxi 214063, China; 2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper investigates a centrifugal compressor and analyzes a critical phenomenon that an upper limit exists that the restart rotational speed of the auxiliary power unit (APU) cannot surpass. We obtain the numerical features of flows running through the compressor. Based on this, the forces imposed on the rotor blades and the variation trends of the corrected mass flow rate are dissected. These analyses demonstrate that (1) windmill's state parameters obtained through interpolation in speed characteristic lines, like the mass flow rate, the pressure ratio and the temperature ratio, are accurate and reliable; (2) the main driving area is the backward-curved part of the rotor blades when the incoming flow thrusts the compressor; (3) the rotor outputs torque at a rotational speed of 5% or lower of the designed value, and restores the operation on the flow as the speed rises to 15% or higher of the designed value, resulting in an increase of the mass flow rate and the flow pressure; (4) the trends that the relative mass flow rate follow as the flight condition and the compressor rotational speed change can help to explain the upper limit of the rotational speed during APU airborne ignition.

Key words: centrifugal compressor; windmilling characteristics; windmilling start; numerical simulation

辅助动力装置作为现代民航客机、先进军用飞机必备的机载设备, 在主发起动、座舱引气、辅助供电、应急能源等方面发挥着作用, 其军事价值和经济效益非比寻常。中国经过多年的技术攻关, 实现

了先进战机、大型运输机辅助动力装置的自主研发, 增强了中国机载设备自主保障能力。然而, APU 研制过程中面临诸多问题, 其中 APU 空中起动事关飞机飞行安全, 必须引起足够重视。

收稿日期: 2021-03-07; **修订日期:** 2021-04-30

通信作者: 李传鹏, 男, 博士, 副教授, E-mail: lichuanpeng@nuaa.edu.cn。

引用格式: 严春晨, 朱珈驹, 李传鹏. APU 风车启动中压气机特性计算与分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 435-441. YAN Chunchen, ZHU Jiayu, LI Chuanpeng. Numerical analysis of a centrifugal compressor in APU windmill[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 435-441.

风门式进气系统的APU可利用冲压气流风车起动,APU空中起动要求喷油点火时风车转速不大于15%Nd~18%Nd(Nd为设计转速),而飞机主动力——涡扇发动机空中起动的风车转速要求不低于30%Nd~40%Nd。暂且不论风车起动点火转速的具体数值,为何APU风车转速设置上限值,而主发动机风车起动有下限值呢?

当前,飞机主发动机的压气机通常为轴流风扇/压气机,转子叶片很容易被冲压气流吹转,而APU压气机以离心压气机为主,即便离心工作叶轮采用导风轮和后弯叶片,工作叶轮受到气流冲击转动的的作用面与轴流转子叶片相比小很多。换言之,在同等流速作用下,离心压气机风车转速较轴流压气机低很多。APU风车转速超过上限值,表明流经离心压气机的空气流量很大,燃烧室燃油与空气的混合气体难以点燃或火焰难以稳定。

诚然,风车状态下发动机转动很大程度上源于涡轮工作叶片受气流冲击作用。上述问题还可以从另外一个角度予以阐述。涡扇发动机压气机设计压比为30~50,APU压气机设计压比为4~8。压比决定了压气机进出口截面面积比。风车状态下,压气机压比很低,出口面积限制了空气流量,对于高压比的涡扇发动机更为甚之。主发动机风车转速小于下限值时,有可能出现燃烧室进口空气流量小、压力低,油气混合物点燃和稳定燃烧十分困难;或出现转速悬挂,涡轮前温度过高以及高压压气机失速等问题。反观低设计压比APU,压气机进出口面积相差不大,当不易吹转的离心压气机转速达到12%左右时,燃烧室进口气流就有可能具备点燃稳定燃烧能力了。很显然,燃烧室高空点火性能、点火包线与发动机风车状态下的压气机流量、压力等特性息息相关,即压

气机风车特性将决定能否风车起动及其起动加速性能。许多学者采用理论推导^[1-8]、试验和数值模拟^[9-17]等手段对发动机的风车工作状态展开研究。不过,研究工作主要聚焦于轴流风扇/压气机的大中型涡喷、涡扇发动机,以离心压气机为压缩部件的发动机仅有少量公开文献,而APU的风车状态研究未见报道。

本文针对某型APU的动力段离心压气机,计算离心压气机风车工作流动特点,分析工作叶轮叶片受力情况、离心压气机出口折合流量变化趋势,对APU风车点火转速展开讨论。

1 研究对象与数值方法

采用文献[18-19]一样的离心压气机模型,该模型以DDA 404-III为原型进行相似模化,压气机转速、流量和压比与131-9型APU动力段压气机参数相近。压气机工作叶轮包括15个主叶片和15个分流叶片,扩压器叶片由24片楔形叶片组成。

采用商业计算软件CFX对上述离心压气机进行数值模拟,使用NUMECA Autogrid划分网格。湍流模型采用SST模型,网格总量300万个,壁面第一层网格高度降为 2×10^{-6} m,可保证计算的工作状态范围内 $y^+ < 1$ 。表1给出了260万、300万和370万个计算网格获得的设计转速下的流量、压比和效率,其数值差别很小,说明3套网格中计算结果已与网格无关。但采用增加出口静压进行节流计算时,260万个网格模型能够稳定收敛的出口静压较300万和370万个网格低,而300万与370万个计算发散的出口背压非常接近。故选用300万个网格进行后续计算。

表1 三套网格计算结果比较
Table 1 Mesh independence analysis

网格/万个	260			300			370			
	流量误差/%	压比误差/%	效率误差/%	流量误差/%	压比误差/%	效率误差/%	流量/(kg·s ⁻¹)	压比	效率	
	3.0	-0.050	0.041	0.140	-0.086	1.845	1.563	1.842	3.214	0.521
	4.0	-0.050	-1.225	-0.811	-0.086	-1.877	-1.391	1.842	4.19	0.639
背压/atm	5.0	-0.030	0.034	-0.424	-0.066	0.042	-0.519	1.842	5.085	0.716
	6.0				-0.030	0.013	-0.150	1.836	6.079	0.761
	6.2				-0.060	0.033	-0.018	1.835	6.278	0.765

注:1 atm=101 325 Pa。

APU风车起动是一个动态过程,压气机风车状态的流动瞬息万变,精确模拟APU离心压气机风车特性不仅需要求解非定常的N-S方程,还需要清楚APU进排气系统、燃烧室等部件的流动特性。

由于缺乏离心压气机上下游部件的相关数据,且重点在于对比分析不同飞行条件下各个转速的风车特性。本文作了以下假设和简化,采用求解RANS方程定常解来分析离心压气机特定风车转速下的

流动。(1) 给定工作叶轮转速;(2) 压气机进口总压总温统一假定为自由来流的总压总温值;(3) 出口静压为飞行高度下的大气压力。后两条简化可视为离心压气机部件的飞行试验。

表 2 给出了部分风车计算状态的总压和总温数据, Ma 为 0 的总压即为该飞行高度下的大气压力,也是风车计算时给定计算域的出口背压。

表 2 风车状态计算的总压和总温

Table 2 Boundary conditions for windmilling states

Ma	总压/Pa			总温/K		
	6 km	8 km	10 km	6 km	8 km	10 km
0	47 198.82	35 618.18	26 453.79	249.14	236.14	223.14
0.4	52 699.94	39 769.55	29 537.03	257.11	243.70	230.28
0.5	55 987.84	42 250.74	31 379.82	261.60	247.95	234.30
0.6	60 202.27	45 431.12	33 741.91	267.08	253.14	239.21
0.7	65 469.55	49 406.03	36 694.09	273.56	259.28	245.01
0.8	71 947.05	54 294.22	40 324.57	281.03	266.37	251.70

2 结果分析

2.1 低转速特性

图 1 给出了飞行高度分别为 6、8、10 km 和马赫数 0.40~0.80(增量 0.05) 共计 27 个风车状态下,离心压气机物理转速分别为 5%Nd、10%Nd、

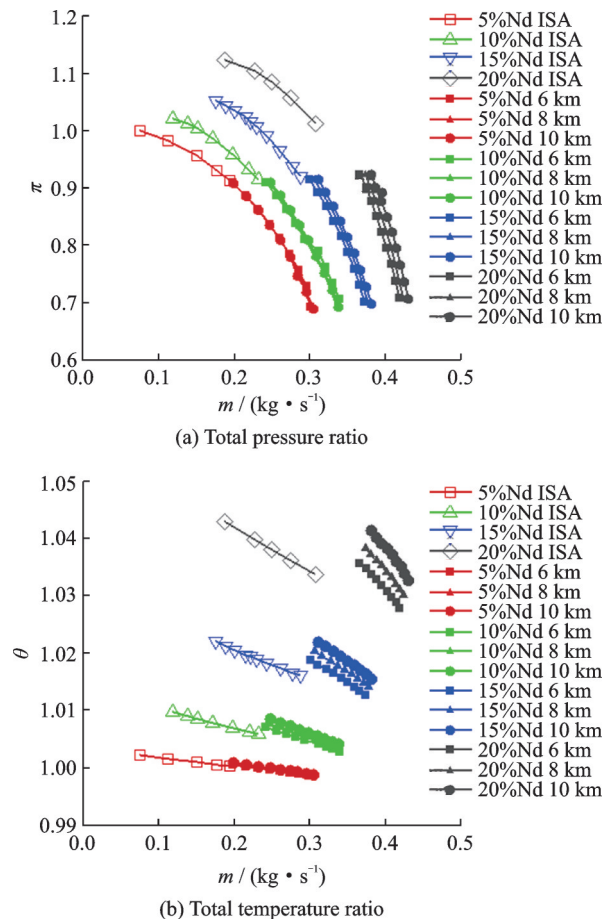


图 1 离心压气机低转速特性

Fig.1 Low speed performance of centrifugal compressor

15%Nd、20%Nd 设计转速时计算获得的特性(实心点特性线),图中也给出了标准大气进口条件 (ISA) 下 5%Nd、10%Nd、15%Nd、20%Nd 设计转速的离心压气机等转速特性(空心点特性线)。表 3 列出风车状态下对应的折合转速变化范围。尽管风车状态计算给定的是物理转速,然而 5%Nd 和 10%Nd 的折合流量-压比曲线与低转速标准进气的特性曲线能够平顺地衔接着。15%Nd 和 20%Nd 时,进口总温对流量-压比曲线的影响也就体现在折合转速的差异了。流量-温比曲线对进口总温(折合转速)就很敏感了。初步看来,采用等转速通用特性插值获得高空飞行风车状态的流量、压比和温比的精度和置信度都是可取的。

表 3 风车状态下对应的折合转速变化

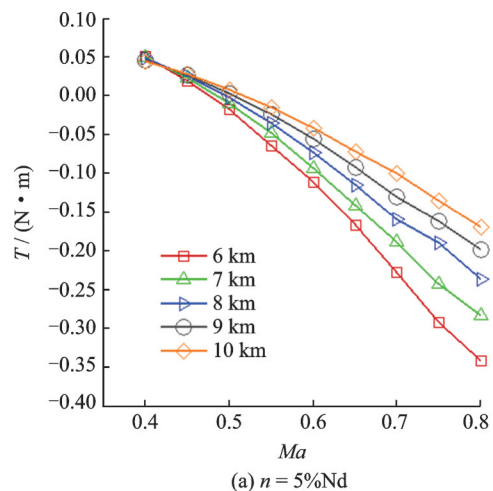
Table 3 Corrected speed variation in windmilling states

物理转速/ Nd	折合速度	
	6 km, 0.8Ma	10 km, 0.4Ma
5%	5.063%	5.593%
10%	10.126%	11.186%
15%	15.189%	16.779%
20%	20.252%	22.372%

2.2 离心压气机风车特性

图 2 给出了飞行高度 6~10 km、飞行马赫数 0.40~0.80 定常计算获得的离心压气机 4 个转速下的工作叶轮扭矩。图中显示:工作叶轮在 5%Nd 转速时扭矩正负值皆有,在低 Ma 气流作用下,要维持 5%Nd,则需要输入扭矩(正值);当飞行 Ma 大于 0.5 后,冲击气流作用下离心压气机不仅能维持 5%Nd 的自转,还有富余的扭矩(负值)可输出,可以确定此时离心压气机处于涡轮模式。其他 3 个转速的扭矩均为正值,表明需要输入扭矩(正值)才能维持该转速的运转。不同的是,10%Nd 工作叶轮扭矩随着来流 Ma 数增加先略上升后下降,15%Nd 和 20%Nd 的扭矩随着 Ma 数增加而上升。

前已述及,后弯叶片是冲击气流吹转离心压气机



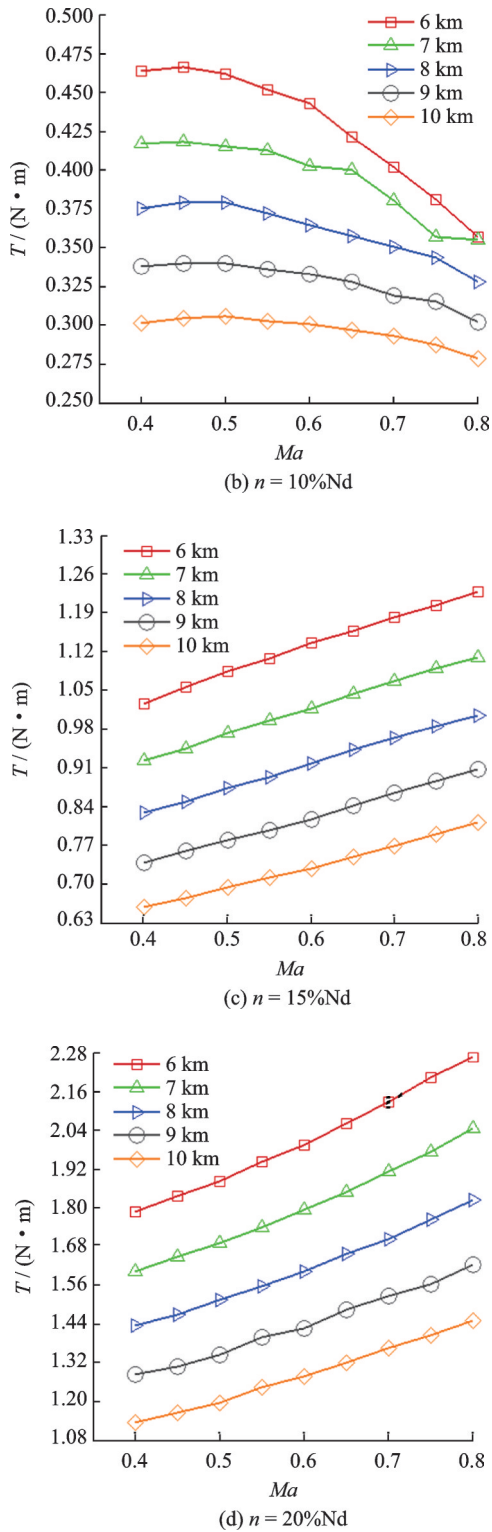


图2 风车状态的转子扭矩

Fig.2 Shaft torque in windmilling states

工作叶轮的主要受力面。由速度三角形关系可知,当流经工作叶轮叶片通道气流的相对速度指向叶片吸力面时,气流对这部分叶身产生推转的气动力,反之,气流相对速度指向叶片压力面时,叶身推动气流。

显然,风车状态下离心压气机工作叶轮内气流的相对速度与牵连速度(转速)有很大关系。15%Nd及以上设计转速使得气流相对速度指向叶片压力面,来流 Ma 增加时,相对速度方向会向吸力

面侧偏移,但由于牵连速度非常大,而使得相对速度仍然指向叶片压力面,且气流流量愈高,工作叶轮推动气流的扭矩愈大。10%Nd的气流相对速度在部分流向位置指向叶片吸力面,且随着 Ma 增加,相对速度方向向吸力面侧偏移,指向叶片吸力面的占比增加,气流推动叶片的力矩加大,叶片推动气流的力矩减小,这种趋势与流量的增加共同作用,从而表现出扭矩随着来流 Ma 数增加先略上升后下降。

从扭矩变化规律可以看出,离心压气机转速达15%Nd后,工作叶轮对气流做功,发挥泵气增压功能,气流流量、压力得到提升。

飞行高度对工作叶轮扭矩的影响可归结为高度对大气密度或流量的影响。相同飞行 Ma 数下,高度越大,空气密度越低,流经工作叶轮的流量越小,无论是空气驱动力矩(负值)还是气体阻力矩(正值),其数值的绝对值越小。

比较4个转速下的扭矩数值大小可以发现,相同飞行条件下,工作叶轮转速越高,离心压气机所需输入驱动力矩(正值)越大。所有算例中,离心压气机部件仅5%Nd能在飞行 $Ma=0.5$ 附近达到扭矩等于0的风车平衡状态。

图3给出了飞行 Ma 数0.8、高度6 km工况下

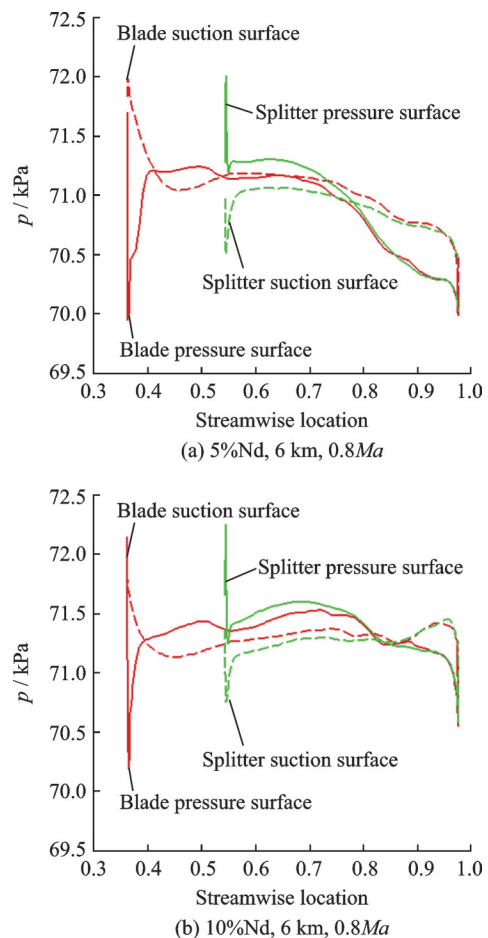


图3 工作叶轮叶片静压沿程分布

Fig.3 Surface pressure of impeller main blade and splitter

叶中截面的静压沿程分布。由图可以看出,主叶片前缘附近(导风轮)叶片吸力面压力明显高于压力面,表明来流冲击在导风轮的叶背上,表明导风轮为气流冲击的受力面。

5%Nd下,主叶片在距离进口截面0.4~0.52流向位置处的压力面压力高于吸力面,0.52~0.7流向位置两侧压力相当,0.7至尾缘处吸力面压力高于压力面;分流叶片从前缘至0.78位置压力面压力高于吸力面,0.78至尾缘处吸力面压力高于压力面。

10%Nd下,主叶片0.4~0.8流向位置的压力面压力高于吸力面,0.8~0.88流向位置两侧压力相当,0.88至尾缘处吸力面压力高于压力面;分流叶片从前缘至0.85位置压力面压力高于吸力面,0.85至尾缘处吸力面压力高于压力面。

该离心压气机叶片在流向0.75位置处叶片后弯程度开始加大,5%Nd下主叶片和分流叶片后弯部分吸力面压力明显高于压力面的起始位置落在0.75位置附近,10%Nd后弯部分吸力面压力高于压力面的起始位置往后推至0.85位置处。这印证了后弯叶片也是气流冲击的主要受力面的说法,同时也佐证了牵连速度(转速)对叶片受力有很大影响。

图4给出了各种飞行条件下的流经离心压气机的空气流量。很显然,物理流量 m 随着飞行 Ma 数增大而增加,随飞行高度增加而减少;离心压气机转速越高,物理流量越大。

将离心压气机空气流量换算至标准大气条件得到的折合流量如图5所示。可以看出,折合流量 m_{cor} 随着飞行 Ma 数增大而有所增加;5个高度压力下的5%Nd和10%Nd折合流量线基本重叠在一起,15%Nd和20%Nd的折合流量随着飞行高度的升高而有所增加,飞行高度对折合流量影响随着转速增加而逐渐凸显出来。

这源于压气机物理转速一定时,高度愈高,气温愈低,进口总温也愈低,折合转速愈高,进口总压和出口背压一定,则折合流量变大。物理转速越

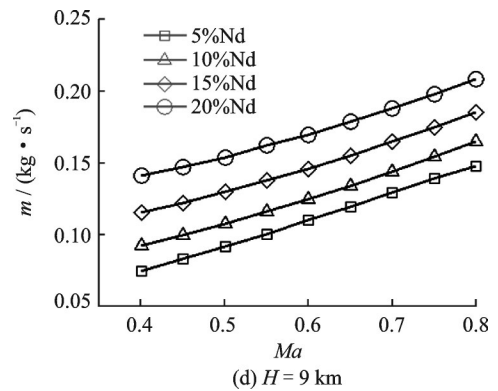
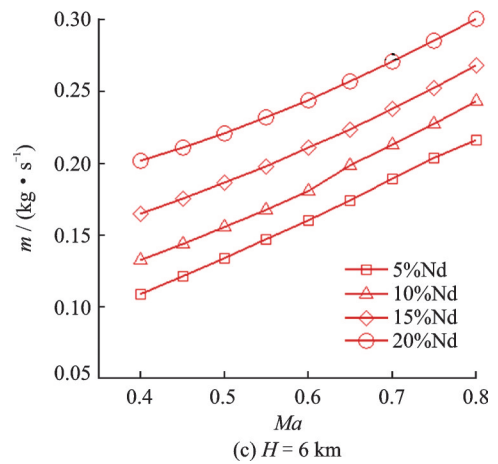
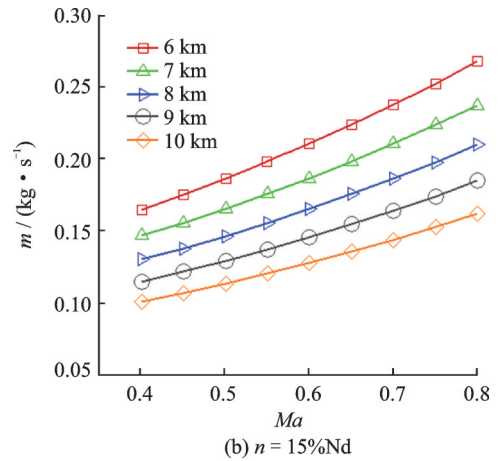
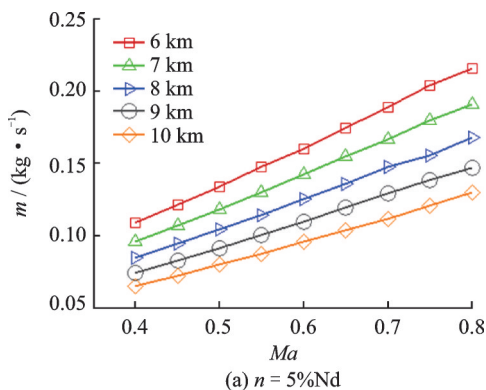


图4 风车状态的压气机流量

Fig.4 Mass flow rate in windmilling states

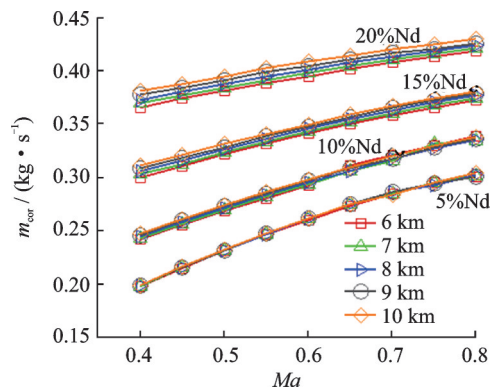


图5 风车状态的压气机进口折合流量

Fig.5 Inlet corrected mass flow rate in windmilling states

大,总温变化引起的折合转速变化越大,所以高转速的折合流量受飞行高度影响越明显。

压气机出口折合流量是代表压气机出口(即燃烧室进口)气流速度的量,而合适的燃烧室气流速度对于火焰稳定以及转子加速性能来说至关重要,因此有必要考量风车状态下压气机出口折合流量的大小及其变化规律,以判断APU在何种条件下可以实现风车成功点火和稳定燃烧。本文以离心压气机设计点出口折合流量为参照,定义风车状态下出口流量的相对值

$$\bar{q}(\lambda) = \frac{q(\lambda)_{\text{out}}}{q(\lambda)_{\text{out},d}}$$

式中: $q(\lambda)_{\text{out}}$ 为该状态下的压气机出口折合流量; $q(\lambda)_{\text{out},d}$ 为设计点的压气机出口折合流量。

图6给出了出口流量相对值随转速 n 和飞行 Ma 数的变化曲线。转速一定时,飞行 Ma 数越高,出口流量相对值越大;一定飞行 Ma 数下,相对值随着转速增加而增加;飞行高度对出口流量相对值影响较小,相对值随高度略有增加。

假定空中点火要求出口流量相对值落在0.9~1.1的范围内时,则低飞行 Ma 数点火范围很窄,且对应着高物理转速,本文算例中,飞行 Ma 分别为

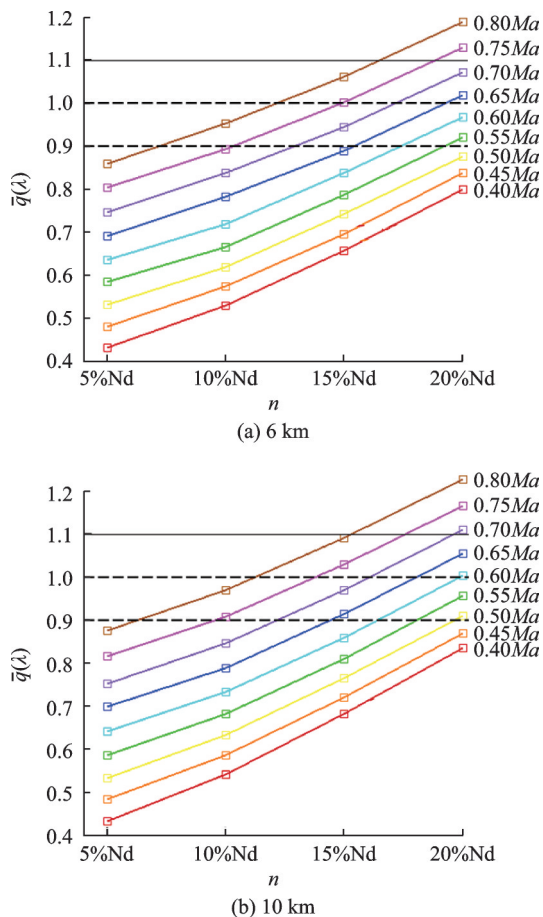


图6 出口流量相对值随转速和飞行 Ma 数的变化

Fig.6 Relative flow rate of compressor outlet

0.4、0.5的相对值均低于0.9;飞行 Ma 数越高,则落在区间的转速值变小,譬如6 km、 $Ma=0.75$ 对应的转速范围为10%Nd~18%Nd,而 $Ma=0.8$ 对应的转速范围变成7%Nd~16%Nd;飞行高度增加时,落在区间的转速值会进一步变小。

尽管这里定义的出口流量相对值用于评判燃烧室点火稳定燃烧过于简单草率,但是,出口流量相对值随飞行条件和压气机转速变化规律对于理解APU空中点火转速存在上限值大有帮助和启迪。图6不仅说明了对于每一条等 Ma 数曲线,都有一个对应着相对值等于1.1的压气机转速值,而且还预示着APU空中点火控制规律需要依据飞行高度、飞行 Ma 数对点火转速进行调整。

3 结 论

本文针对某离心压气机风车特性简化计算模型,采用求解RANS方程定常解来分析离心压气机风车工作流动特点,剖析了工作叶轮叶片受力情况,分析了离心压气机出口折合流量相对值变化趋势,探讨了APU风车点火转速存在上限值的成因。主要结论有:

(1) 导风轮和后弯叶片是气流冲击工作叶轮输出扭矩之处;在5%Nd、飞行 Ma 大于0.5时气流产生驱动力矩,其余计算工况下气流产生阻力矩,力矩绝对值随飞行高度增加、流量减少而减小;阻力矩随转速增加而增加;随飞行 Ma 增加,流量增加,两者影响占比不同使得阻力矩在10%Nd下先略上升后下降、在15%Nd和20%Nd下上升。

(2) 压气机折合流量在较小转速下几乎不随飞行高度变化、在较大转速下由于温度对折合转速的影响开始变得显著而呈现出随飞行高度增加而略有增加的趋势。

(3) 压气机出口流量相对值对于燃烧室能否成功点火及实现火焰稳定有重要影响,其值随转速增加和飞行 Ma 增加而增加,随高度增加仅略微增加;该规律可为制定和调整APU空中点火规律提供思路。

参考文献:

- [1] 高扬,李密,高磊.基于相似原理的风车状态进口空气流量和内阻力估算方法[J].航空发动机,2018,44(2):98-102.
GAO Yang, LI Mi, GAO Lei. Estimation method of windmilling inlet air flow and internal drag based on similarity principle[J]. Aeroengine, 2018, 44(2): 98-102.
- [2] ZACHOS P K. Modelling and analysis of turbofan en-

- gines under windmilling conditions[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29(4): 882-890.
- [3] PRASAD D. Aerodynamic similarity principles and scaling laws for windmilling fans[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(12): 4041375.
- [4] 王占学,刘增文.某型燃气涡轮发动机风车状态内阻力的计算[J].*燃气涡轮试验与研究*,2006,19(3): 8-10,52.
WANG Zhanxue, LIU Zengwen. The calculation of windmilling characteristics of a gas turbine engine[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2006, 19(3): 8-10,52.
- [5] 郭秉衡,许彪,张登洲.双转子涡喷发动机风车特性的计算与分析[J].*航空学报*,1995,16(5): 528-533.
GUO Bingheng, XU Biao, ZHANG Dengzhou. Calculation and analysis of windmilling characteristics of twin-spool turbojet engine[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*,1995, 16(5): 528-533.
- [6] BINDER N, COURTY-AUDREN S, DUPLAA S, et al. Theoretical analysis of the aerodynamics of low-speed fans in free and load-controlled windmilling operation[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(10): 4030308.
- [7] LIM S, ROH T, HONG Y, et al. Study of windmilling characteristics of twin-spool turbo-fan engines [C]//*Proceedings of the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*. [S.l.]: AIAA, 2002.
- [8] SU Y I, JIN S S, SHIK L J. Windmilling characteristics of centrifugal-flow turbojets[J]. *KSME International Journal*, 2004, 18(11): 2021.
- [9] ROSE N G, DUFOUR G, BARENES R, et al. Experimental analysis of the global performance and the flow through a high-bypass turbofan in windmilling conditions[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(5): 051001.
- [10] DUFOUR G, ROSA N G. Validation and flow structure analysis in a turbofan stage at windmill[C]//*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. [S.l.]: [s.n.], 2015: 571-583.
- [11] GUNN E J, HALL C A. Loss and deviation in windmilling fans[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2016, 138(10): 4033163.
- [12] DUFOUR G, THOLLET W. Body force modeling of the aerodynamics of the fan of a turbofan at windmill[C]//*Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2016.
- [13] AURELIE O. Generic properties of flows in low-speed axial fans operating at load-controlled windmill[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(8): 4040678.
- [14] ORTOLAN A, COURTY-AUDREN S K, BINDER N, et al. Experimental and numerical flow analysis of low-speed fans at highly loaded windmilling conditions[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(7): 56577.
- [15] 张媛,马燕荣,郭斌.某型发动机风车特性试验研究[J].*现代机械*,2015(3): 73-76.
ZHANG Yuan, MA Yanrong, GUO Bin. Flight test study of a type of engine's windmill performance [J]. *Modern Machinery*, 2015(3): 73-76.
- [16] 施洋.民用大涵道比涡扇发动机全状态性能模型研究[D].西安:西北工业大学,2017.
SHI Yang. A research on full states performance model for civil high bypass tuobofan engine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.
- [17] 万照云.微型涡轮发动机风车起停特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
WAN Zhaoyun. Research of starting characteristics in windmill state for micro turbine engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [18] 彭文雯,邵小坤,李传鹏.扩压器叶片可调对离心压气机正转逆流性能的影响[J].*南京航空航天大学学报*,2019,51(3): 336-340.
PENG Wenwen, SHAO Xiaokun, LI Chuanpeng. Effect of variable vane diffuser on forced re-verse flow of centrifugal compressor at design speed [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019,51(3): 336-340.
- [19] 邵小坤,李传鹏,闫泽辉.正转逆流工况下离心压气机挡板设计及特性分析[J].*机械制造与自动化*,2020(3): 47-50.
SHAO Xiaokun, LI Chuanpeng, YAN Zehui. Design and characteristic analysis of centrifugal compressor baffle under forward reverse counterflow[J]. *Machine Building & Automation*,2020(3): 47-50.