

空气/烟气组合对波转子发动机性能的影响

邢 菲¹, 张霖琪¹, 产世宁²

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102;

2. 北京航空航天大学 宁波创新研究院

先进飞行器与空天动力创新研究中心, 浙江 宁波 315800)

摘 要: 针对波转子作为燃气轮机高压级构成的波转子发动机, 考虑波转子普遍存在的烟气回流、空气排放现象及其形成的空气/烟工质组合, 建立热力学控制方程组, 对波转子发动机总体方案进行对比和参数分析, 并且基于热力循环模型分析参数影响关系的热力学原理。分析结果表明: 烟气回流和空气排放的流量比例的增加会在不同程度上降低波转子发动机的循环功与热效率; 烟气回流对总体性能的影响程度小于空气排放; 适当提高波转子压比可以在考虑烟气回流和空气排放影响的前提下保持波转子发动机的总体性能。

关 键 词: 波转子; 总体性能; 烟气回流; 空气排放; 流量比例; 热力循环模型

中图分类号: V235.22

文献标志码: A

Effect of fresh air/exhaust gas combination on performance of wave-rotor-topped gas turbines

XING Fei¹, ZHANG Linqi¹, CHAN Shining²

(1. School of Aerospace Engineering,

Xiamen University, Xiamen Fujian 361102, China;

2. Aircraft and Propulsion Laboratory, Ningbo Institute of Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Ningbo Zhejiang 315800, China)

Abstract: For the wave-rotor-topped gas turbines, the exhaust gas recirculation and the fresh air exhaustion phenomena in wave rotors were considered and the status how the fresh air or exhaust gas splits and merges due to the phenomena was studied. The thermodynamic governing equations were derived, comparison and parametric investigation on the general designs was conducted, and regulations in the parametric investigation results were analyzed based on thermodynamic models. Results showed that: the exhaust gas recirculation and the fresh air exhaustion reduced the work output and the thermal efficiency by different degrees; the effect of the exhaust gas recirculation was smaller than the fresh air exhaustion; an appropriate increase in the wave rotor pressure ratio could keep the general performance of the wave-rotor-topped gas turbine with the effects of the exhaust gas recirculation and the fresh air exhaustion.

收稿日期: 2019-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51906007); 重点实验室基金一般项目(6142702190204)

作者简介: 邢菲(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为航空发动机燃烧学、燃烧室设计及低污染燃烧等。

通讯作者: 产世宁(1989—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为波转子气波增压技术、低污染燃烧技术、叶轮机械技术及新能源技术。E-mail: chansn2010@gmail.com

引用格式: 邢菲, 张霖琪, 产世宁. 空气/烟气组合对波转子发动机性能的影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(2): 225-234. XING Fei, ZHANG Linqi, CHAN Shining. Effect of fresh air/exhaust gas combination on performance of wave-rotor-topped gas turbines[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2): 225-234.

Key words: wave rotor; general performance; exhaust gas recirculation; fresh air exhaustion; percentages of the mass-flow rates; thermodynamic cycle model

燃气涡轮发动机经历数十年的技术发展,其性能已达到较高水平,但进一步提高也面临很大的技术挑战。新的技术挑战体现到热力循环的两个关键指标——循环增压比与循环最高温度上,尤其需要突破传统增压、膨胀部件(压气机、涡轮)的增压能力与热防护能力瓶颈。在此背景下,一些新技术表现出突破传统技术瓶颈的潜力,波转子就是其中之一。

波转子由转子与静子构成,如图 1(a)所示。静子上共有 2 对进/排气端口,分别吸入、排出增压工质与膨胀工质;转子上有一圈通道,每个通道都会交替地流过增压工质与膨胀工质。转子的每个通道都会在转过一个进/排气端口的前缘或尾缘的时刻触发一道非定常压力波。一系列非定常压力波按照设定的时间顺序交替地扫过此通道,从而在转子的通道内部完成工质的增压与膨胀。因此,波转子在动力循环中兼具增压与膨胀两项功能。将波转子嵌入燃气涡轮发动机,作为高压级转子,就构成波转子发动机,如图 1(b)所示。图中 T_{turbine} 为发动机涡轮前温度。

非定常压力波的增压原理不同于叶轮机机械,增压能力也不受压气机技术瓶颈的限制,所以波转子可以在压气机增压过程的末端再次对空气增压,从而提高发动机的循环增压比;与此同时,由于波转子的通道交替地流过高温的膨胀工质与低温的增压工质,所以低温工质会自动地冷却通道,等效于提高了热防护能力,从而可以在涡轮之前承受更高的气流温度。综合以上两点,波转子凭借其增压原理与自冷却能力,可以在保持涡轮进口温度不变的前提下提高循环最高温度与循环增压比,从而提高航空发动机总体性能,如图 1(b)所示。

波转子最初是作为火车燃气轮机的增压器发明的;后来在汽车活塞发动机领域作为尾气余热利用装置(类似涡轮增压器)得到充分发展直至定型为 Comprex® 并市场化应用^[1]。在航空发动机领域,将波转子作为燃气轮机高压级的技术自 20 世纪 80 年代起即已吸引国内外的研究兴趣。基于热力循环建模与发动机总体性能分析,罗-罗(RR)、通用(GE)电气等航空发动机公司针对涡扇、涡轴等不同背景技术论证了波转子对发动机总体性能的作用^[2]。其中最具代表性的工作是 Snyder

针对 RR Allison Model 250 型涡轴的研究,通过总体分析详细地论证了波转子可提高传统发动机 20% 的单位功率,降低 22% 的单位耗油率^[3]。

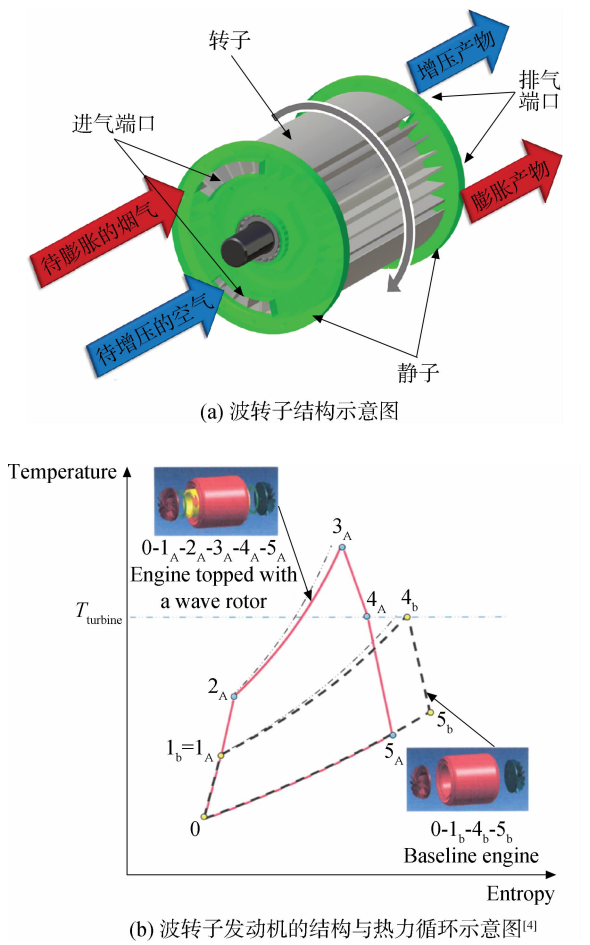


图 1 波转子部件和波转子发动机
Fig. 1 Wave rotor component and wave-rotor-topped gas turbine

2000 年以来,国外的密歇根州立大学^[4-5]、美国国家航空航天局(NASA)^[6-7]、普渡大学^[8]、克兰菲尔德大学^[9]等,国内的北京工业大学^[10]、大连理工大学^[11]、南京航空航天大学^[12]、中国航空发动机集团公司湖南动力机械研究所与北京航空航天大学^[13-15]等单位针对不同类型的波转子持续开展研究工作,不仅通过部件样机试验验证、流场细节 CFD 模拟分析等研究论证了波转子部件技术的可行性与潜在优势,而且通过总体性能分析研究初步掌握了波转子发动机的性能规律。其中,密歇根州立大学的波转子发动机总体性能分

析研究工作从总体设计优化的角度出发,广泛地考虑了波转子与燃气轮机的其他部件组合的不同方式对循环功、热效率与耗油率指标的不同影响,并结合参数分析与优化,形成了针对具体性能需求优化的波转子发动机总体方案^[4]。而克兰菲尔德大学则更深入地考虑波转子内部热力过程的细节,将工质在波转子内部热力过程的逐步变化计入发动机总体循环中,形成了更加细致的总体性能分析模型与总体设计研究结论^[9]。综上所述,波转子发动机总体分析研究表现出优化设计逐渐系统化、热力过程模型逐渐细化的趋势。

然而,从热力循环建模的角度出发,不仅需要考虑热力过程的分步,也需要考虑参与不同热力过程的工质流量分配问题。如图 1 所示,波转子部件的进气包括来自压气机的空气、来自燃烧室的烟气两种工质。而一种普遍存在于波转子中的现象——烟气回流现象则会导致这两种工质在波转子内部分股、汇合,形成更加复杂的多股工质流动,而每一股工质的流量分配更加复杂。波转子内部的烟气回流现象在 20 世纪 80 年代就有研究涉及^[2]。20 世纪 90 年代之后,越来越多的数值模拟结果包含更丰富的流场信息,其中就包括烟气回流现象^[16-17]。国内新近研究则在试验中检测到了波转子烟气回流现象及其形成的多股工质流场^[15]。此外,一些波转子中还存在空气排放现象,也已在试验中测试验证^[15]。空气排放与烟气回流都会导致工质在波转子内部分股^[18]。

烟气、空气工质在波转子内部分股,而核心现象——烟气回流和空气排放的特征则量化为各股工质流量的组合。不同的波转子设计方案具有不同的工质流量组合,同一个波转子部件随着发动机进气条件、燃烧室温度变化而发生工况变化,也会改变波转子内部的工质流量组合。各自具有不同的流量的空气或烟气工质经历不同的热力过程,所以生成或消耗不同的热力过程功;而多股空气/烟气工质的不同流量组合则最终对总体循环功与热效率指标产生关键影响。

如上所述,尽管多股空气/烟气工质的流量组合问题具有一定普遍性,目前国内外的波转子发动机总体研究却并未涉及如何在总体设计中考虑此问题。本文工作针对空气/烟气工质在分股现象中的流量分配与热力过程,通过设计方案的对比说明不同流量组合对波转子发动机性能的影响,通过参数分析说明其中规律,进而基于热力循环模型分析造成相应规律的基本原理,最终提出

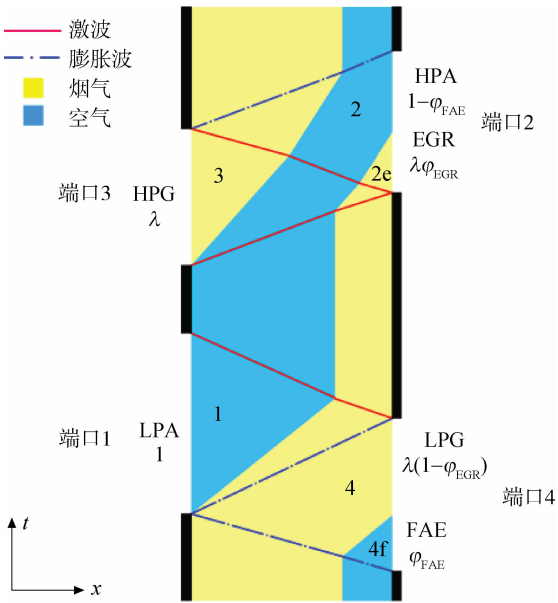
总体设计建议。

1 波转子发动机内部的热力学现象及其控制方程

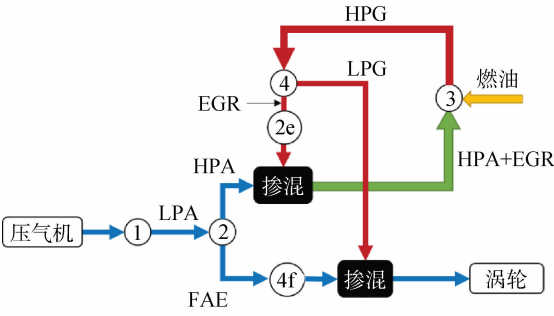
1.1 热力学现象

波转子内部的烟气和空气分股、汇合形成多股工质。图 2(a)是波转子里流场示意图,包含空气、烟气两种物性、温度不同的工质。从一个进气口流入的空气或烟气工质在波转子内部分流,分成两股,各自从两个排气口流出,如图 2(a)所示。图中 HPG (high-pressure gas) 表示高压进气; LPA (low-pressure air) 表示低压进气; HPA (high-pressure air) 表示高压排气中的空气工质; EGR(exhaust gas recirculation)表示高压排气中的烟气工质,由烟气回流现象形成; LPG (low-pressure gas)表示低压排气中的烟气工质; FAE (fresh air exhaustion)表示低压排气中的空气工质,由空气排放现象形成。图中符号 λ 表示波转子高压进气 HPG 与低压进气 LPA 的流量比值,符号 φ 表示无量纲流量比例(0~100%),下标与工质名称对应。如此抽象为工质在波转子内部的分流、在排气口的汇合过程,如图 2(b)所示。如图 2(a)、图 2(b)中的“1、2、3、4、2e、4f”所示,本文用数字(或数字与字母组合)标记气体的热力学状态。

当波转子旋转时,转子左右两端交替地与高压/低压的进出口联通,工质因在通道内产生的激波和膨胀波而压缩和膨胀。如图 2(a)所示,从压气机来的低压空气(LPA)由端口 1 进入波转子,



(a) 多股工质在波转子内部的流场示意图



(b) 多股工质的分股、汇聚示意图

图 2 波转子内部多股工质示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multiple working components of wave rotor

在波转子中被进一步压缩成为高压空气(HPA),由端口 2 排出,进入燃烧室参与燃烧,从燃烧室里出来的高压烟气(HPG)从端口 3 再次进入波转子,进行膨胀,变成低压烟气(LPG),再由端口 4 排出,进入涡轮,继续膨胀。但波转子内部还存在烟气回流(EGR)和空气排放(FAE):一部分烟气没能从端口 4 排出,于是便和空气一起被压缩,由端口 2 再次进入燃烧室参与燃烧,这股气流即为 EGR;而一部分空气没能够从端口 2 排出,而是停留在波转子里,于是这股气流只能随着膨胀的烟气一起从端口 4 流入涡轮,而这股气流就是 FAE。

1.2 控制方程

根据上文所述的热力学现象,一般情况的波转子进气包含 LPA、HPG 两股工质,排气则包含 HPA、EGR、LPG、FAE 四股工质,它们的流量遵守进排气流量守恒。其中燃油流量忽略不计,因为燃油流量与气体工质的流量相比很小。基于相似性的原理,不妨以低压空气的流量为基准 1,并假设高压烟气的流量为 λ 、FAE 的流量比例为 φ_{FAE} 、EGR 的流量比例为 φ_{EGR} 。那么根据空气的质量守恒,流出端口 2 的空气流量即为 $(1 - \varphi_{FAE})$,从端口 4 流出的烟气的流量为 $\lambda(1 - \varphi_{EGR})$ 。多股工质热力过程的波转子发动机结构示意图如图 3 所示,热力循环温熵图如图 4 所示。图中 s 为熵, p 为总压。 p_2 即燃烧室进口总压(循环最高总压), p_4 则是涡轮前总压。

各股工质的流量参数如图 2(a)、图 2(b)的标注所示,图中的数字与图 4 中的各状态点相一致。波转子多股工质的流量守恒方程

$$\lambda \varphi_{EGR} + 1 - \varphi_{FAE} = 1 \quad (1)$$

在流量守恒的基础上,基于热力学理论推导的各热力过程的控制方程组。各个热力过程的描

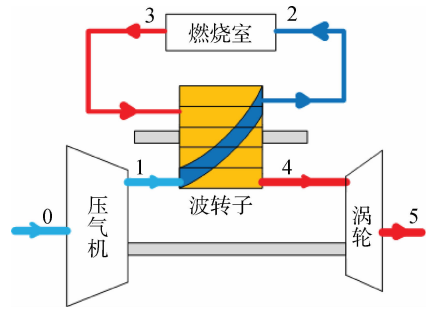


图 3 波转子发动机结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wave-rotor-topped gas turbine

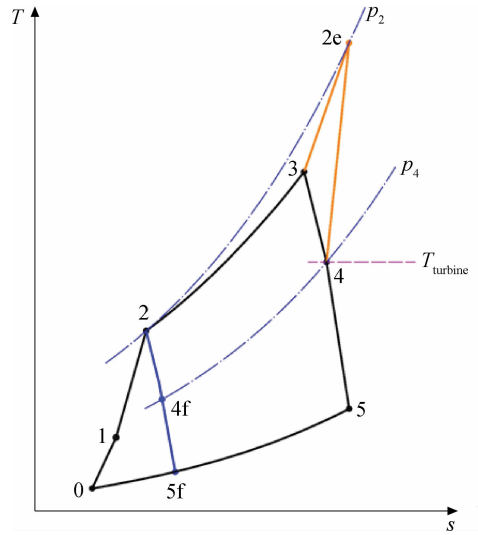


图 4 波转子发动机热力循环 T - s 示意图^[14]

Fig. 4 T - s schematic diagram of the thermodynamic cycle of wave-rotor-topped gas turbine^[14]

述及方程如下:

热力过程 0-1(压气机增压过程)

$$T_1 = T_0 + T_0 \left[\frac{\gamma_{air}-1}{\pi_c \gamma_{air}} - 1 \right] / \eta_c \quad (2)$$

热力过程 1-2(波转子内部空气增压过程)

$$T_2 = T_1 + T_1 \left[\frac{\gamma_{air}-1}{\pi_{wc} \gamma_{air}} - 1 \right] / \eta_{wc} \quad (3)$$

热力过程 3-4(波转子内部烟气膨胀过程)

$$T_3 = T_4 / \left[1 - \eta_{wt} + \eta_{wt} / \pi_{wt} \frac{\gamma_{gas}-1}{\gamma_{gas}} \right] \quad (4)$$

热力过程 2-3(燃烧过程)

$$\pi_{comb} = p_3 / p_2 \quad (5)$$

热力过程 4-5(涡轮膨胀过程)

$$T_5 = T_4 - T_4 \left[1 - \frac{\pi_{wt}}{\pi_{comb} \pi_c \pi_{wc}} \frac{\gamma_{gas}-1}{\gamma_{gas}} \right] \eta_t \quad (6)$$

热力过程 5-0(排气过程)

$$p_5 = p_0 \tag{7}$$

式中 γ_{air} 、 γ_{gas} 分别为空气、烟气工质的比热比; π_c 为压气机总增压比; π_{comb} 为燃烧室总压恢复系数; η_c 、 η_t 分别为压气机、涡轮等熵效率; π_{wc} 为波转子对空气增压的总压比; π_{wt} 为波转子对烟气的膨胀比; η_{wc} 、 η_{wt} 分别为波转子内部增压、膨胀过程的等熵效率; 数字和字母组成的下标与图 4 中的热力状态一一对应; 0-1、1-2、4-2e、2-4f、4f-5f 等下标则与图 4 中的热力过程一一对应。

式(2)~式(7)涵盖发动机主流的热力过程, 与传统燃气轮机形式相同。除主流之外, 波转子发动机的烟气回流、空气排放现象分别包含一部分烟气的再压缩过程、空气的膨胀过程, 如下:

热力过程 4-2e(波转子内部烟气回流过程)

$$T_{2e} = T_4 + T_4 \left[\frac{\pi_{\text{wt}}}{\pi_{\text{comb}}} \frac{\gamma_{\text{gas}}^{-1}}{\gamma_{\text{gas}}} - 1 \right] / \eta_{4-2e} \tag{8}$$

热力过程 2-4f(波转子内部空气排放过程)

$$T_{4f} = T_2 - T_2 \left[1 - \frac{\pi_{\text{comb}}}{\pi_{\text{wt}}} \frac{\gamma_{\text{air}}^{-1}}{\gamma_{\text{air}}} \right] / \eta_{2-4f} \tag{9}$$

热力过程 4f-5f(排出波转子的空气在涡轮中的膨胀过程)

$$T_{5f} = T_{4f} - T_{4f} \left[1 - \frac{\pi_{\text{wt}}}{\pi_{\text{comb}} \pi_c \pi_{\text{wc}}} \frac{\gamma_{\text{air}}^{-1}}{\gamma_{\text{air}}} \right] \eta_{4f-5f} \tag{10}$$

在此基础上推导波转子能量守恒方程。式中 $c_{p,\text{air}}$ 、 $c_{p,\text{gas}}$ 分别为空气、烟气工质的比热容。

$$c_{p,\text{air}} T_1 + \lambda c_{p,\text{gas}} T_3 = (1 - \varphi_{\text{FAE}}) c_{p,\text{air}} T_2 + \lambda (1 - \varphi_{\text{EGR}}) c_{p,\text{gas}} T_4 + \lambda \varphi_{\text{EGR}} c_{p,\text{gas}} T_{2e} + \varphi_{\text{FAE}} c_{p,\text{air}} T_{4f} \tag{11}$$

基于以上热力过程控制方程、质量和能量守恒方程, 可以计算发动机单位进气工质流量折合下的涡轮膨胀功 W_t 。

$$W_t = \lambda (1 - \varphi_{\text{EGR}}) c_{p,\text{gas}} (T_4 - T_{5f}) + \varphi_{\text{FAE}} c_{p,\text{air}} (T_{4f} - T_{5f}) \tag{12}$$

发动机单位进气工质流量折合下的压气机的压缩功

$$W_c = c_{p,\text{air}} (T_1 - T_0) \tag{13}$$

针对波转子发动机, 以循环功和循环热效率作为基本性能指标。波转子发动机单位进气工质的循环功

$$W = W_t - W_c \tag{14}$$

单位进气工质的总吸热量

$$Q = \lambda (1 - \varphi_{\text{EGR}}) (c_{p,\text{gas}} T_3 - c_{p,\text{air}} T_2) + \lambda \varphi_{\text{EGR}} c_{p,\text{gas}} (T_3 - T_{2e}) \tag{15}$$

循环热效率

$$\eta = \frac{W}{Q} \tag{16}$$

2 典型总体设计方案对比

波转子发动机的总体设计研究一般是以单转子燃气轮机作为基准发动机, 设计波转子高压级并且嵌入基准发动机, 而不同的波转子设计参数(例如空气增压比)形成不同的发动机总体方案^[4]。对比不同的波转子发动机方案即可体现、说明波转子设计参数对总体性能的影响。对于本文工作而言, 需要对比说明的波转子参数则是工质的流量组合, 其控制变量分别为 EGR 与 FAE 的流量比例, 反映多股工质流量的不同组合。

在本文分析中, 波转子发动机理想循环的热力过程的等熵效率和燃烧室总压恢复系数都为 1。波转子发动机热力学模型中物性参数和实际循环参数分别如表 1 和表 2 所示, 表 2 的循环参数主要参照波转子领域一型经典的基准发动机——RR C-30 涡轴发动机^[4]。

表 1 波转子发动机热力学模型的物性参数
Table 1 Physical properties of thermodynamic model of wave-rotor-topped gas turbine

变量	数值
γ_{air}	1.4
γ_{gas}	1.33
$c_{p,\text{air}} / (\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K}))$	1.005
$c_{p,\text{gas}} / (\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K}))$	1.148

表 2 波转子发动机实际热力循环参数
Table 2 Parameters of the realistic thermal cycle of wave-rotor-topped gas turbine

变量	数值	变量	数值
η_c	0.796	π_c	3.6
η_t	0.84	π_{comb}	0.98
η_{wc}	0.83	π_{wc}	1.8
η_{wt}	0.83	p_0 / Pa	101325
η_{3-4f}	0.83	T_4 / K	1116
η_{4f-5f}	0.83	T_0 / K	300
η_{4-2e}	0.83		

设计的波转子发动机总体性能如表 3 所示, 表 3 的每一行代表一个方案, 计算了理想循环和实际循环的性能。

表 3 不同流量组合下波转子发动机的性能

Table 3 Performance of wave-rotor-topped gas turbine under different mass-flow ratio combinations

φ_{EGR}	φ_{FAE}	理想循环		实际循环	
		循环功/(kJ/kg)	热效率/%	循环功(kJ/kg)	热效率/%
0	0	292.10	34.51	161.30	19.86
0.1	0	292.10	34.51	156.80	19.30
0	0.1	264.49	34.52	139.74	18.99
0.1	0.1	264.49	34.52	135.41	18.40

由表 3 可知,FAE 流量比例相同、仅 EGR 流量比例不同的方案,在理想循环中具有相同的循环功、热效率;在实际循环中则是 EGR 更多的方案循环功、热效率更低。EGR 流量比例相同、仅 FAE 流量比例不同的方案,在理想循环、实际循环中都是 FAE 更多的方案循环功更低;在理想循环中 FAE 更多的方案热效率更高,但差异仅 0.01 个百分点,非常小;在实际循环中 FAE 更多的方案热效率则明显更低,差异达到约 0.9 个百分点。这样的影响对于航空发动机热力循环热效率而言是很大的,因此需要通过更全面参数分析进一步分析其影响规律。

3 含有空气/烟气工质组合的波转子发动机性能参数分析

3.1 空气/烟气工质流量组合对总体性能的影响

空气、烟气在波转子内部形成 FAE 与 EGR 现象,导致存在多股工质增压、膨胀。FAE 与 EGR 的流量比例影响参与增压、膨胀的工质流量,继而影响总体性能。因此本文的参数分析工作首先研究 FAE、EGR 流量对总体性能的影响。

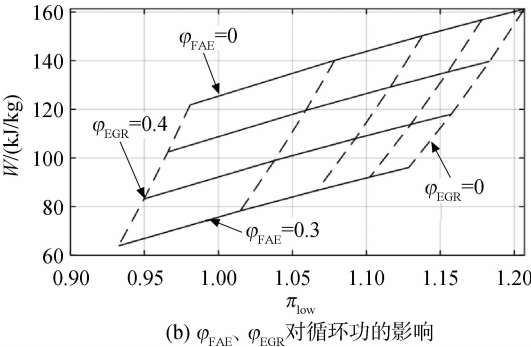
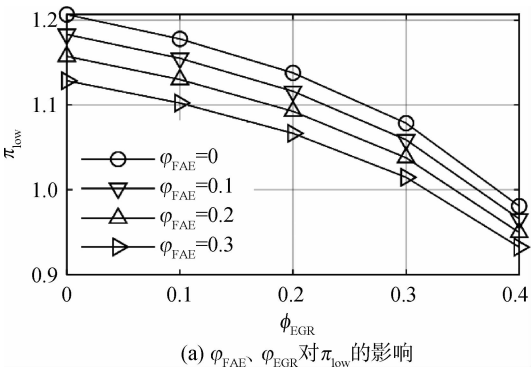
首先针对波转子部件,波转子为涡轮进口提供的压力增益 π_{low} ,定义为 $\pi_{\text{low}} = p_4/p_1$ 。压力增益 π_{low} 不同于总压比 $\pi_{\text{wc}} = p_2/p_1$, π_{low} 代表波转子与燃烧室构成的核心机的进出口总压比值,反映波转子向发动机总体循环输出的直接影响,是波转子部件对总体循环的基本功能指标。EGR、FAE 流量比例对波转子压力增益 π_{low} 以及波转子发动机主要指标的影响如图 5 所示。

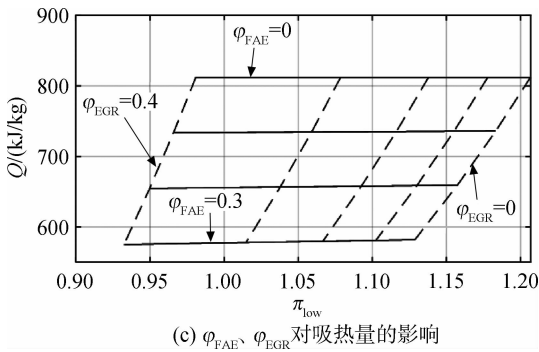
图 5(a)是实际循环下 FAE 或 EGR 流量比例对 π_{low} 影响的曲线图。 π_{low} 随 FAE 或 EGR 流量比例的增大而减小。这说明随 FAE 或 EGR 流量比例的增大,质量守恒使参与波转子内部增压、膨胀过程的每一股工质流量都各有增减;在波

转子压比、压气机出口状态、涡轮前温度给定的情况下(如表 2 所示),波转子需要更充分的膨胀才可以保持自身的能量守恒;而这代表波转子膨胀产物压力(p_4)降低,所以 $\pi_{\text{low}} = p_4/p_1$ 降低。

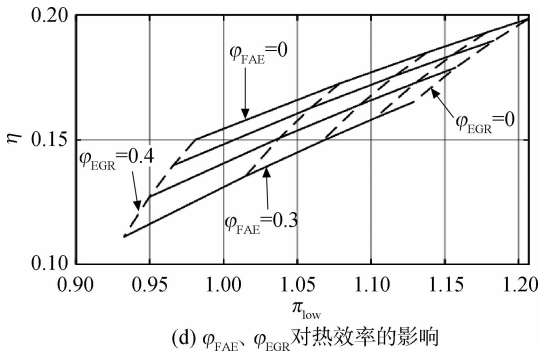
图 5(b)~图 5(c)分别是发动机进气单位流量工质的循环功、吸热量的地毯图。图 5(b)~图 5(c)的网格线分布说明,FAE 或 EGR 流量比例增加导致循环功、吸热量都减小。然而对比图 5(b)和图 5(c)的纵坐标值范围可知,循环功的相对变化大于吸热量,所以热效率 $\eta = W/Q$ 也是递减的,如图 5(d)所示。

进而横向对比 FAE 与 EGR 影响程度的差异。图 5(b)~图 5(d)网格线中,虚线(φ_{EGR} 等值线,随 φ_{FAE} 变化而变化)的斜率都大于实线(φ_{FAE} 等值线,随 φ_{EGR} 变化而变化),说明 EGR 对循环功、吸热量、热效率值的影响程度都是小于 FAE





(c) φ_{FAE} 、 φ_{EGR} 对吸热量的影响



(d) φ_{FAE} 、 φ_{EGR} 对热效率的影响

图 5 φ_{FAE} 、 φ_{EGR} 对性能参数的影响

Fig. 5 Effect of φ_{FAE} 、 φ_{EGR} on performance parameters

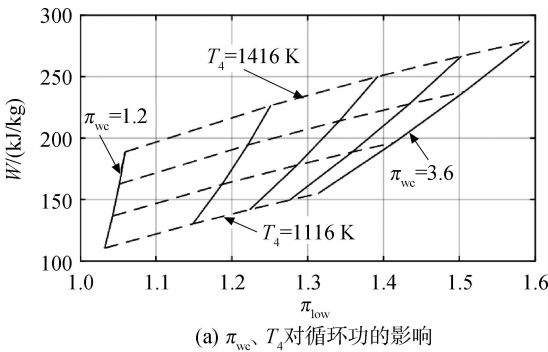
的。尤其是对于图 5(c)所示的吸热量,实线的斜率几乎为 0,说明在保持 FAE 流量比例不变的情况下,仅改变 EGR 流量比例对波转子发动机的吸热量几乎没有影响。

基于对流量组合的参数分析,波转子发动机总体设计对 FAE 流量比例的限制应当比 EGR 更严格,才能保持循环功、热效率性能指标水平。

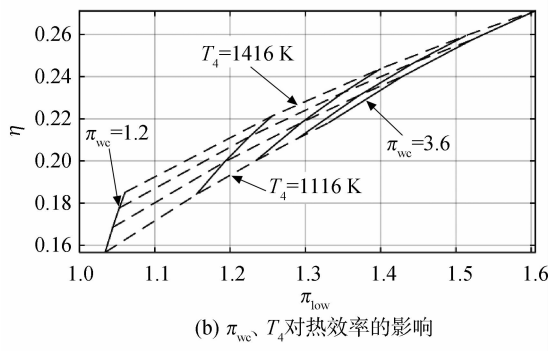
3.2 波转子压比和涡轮前温度对总体性能的影响

考虑到更高的基准发动机循环参数、更高的波转子压比在目前的技术水平下已经可行,相应的波转子发动机性能也会有所变化,所以本节分析波转子的空气增压比 π_{wc} 、发动机的涡轮前温度(即波转子低压端口输出的烟气总温 T_4)对波转子发动机总体性能的影响。本节的分析的对象也是包含空气/烟气多股工质的波转子发动机,参照文中第 3.1 节的研究结果选取 $\varphi_{\text{FAE}}=0.1$ 、 $\varphi_{\text{EGR}}=0.1$ 。在给定的流量比例前提下,关键热力循环指标参数分析结果的地毯图如图 6 所示。

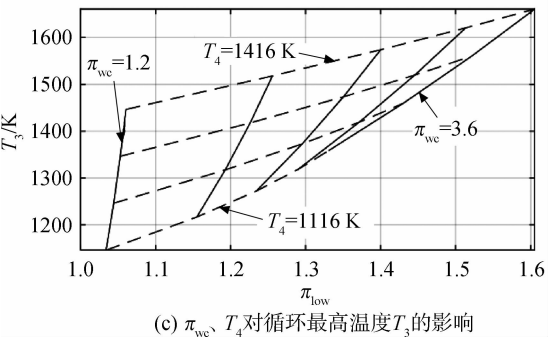
图 6(a)~图 6(b)所示的循环功、热效率指标都随 π_{wc} 或 T_4 的增加而升高,说明提高波转子压比或发动机涡轮前温度都有利于提高热力循环性能。图 6(c)则补充说明了提高性能在热力循环内部引起的一个具体变化,即循环最高温度(总



(a) π_{wc} 、 T_4 对循环功的影响



(b) π_{wc} 、 T_4 对热效率的影响



(c) π_{wc} 、 T_4 对循环最高温度 T_3 的影响

图 6 π_{wc} 、 T_4 对性能参数的影响

Fig. 6 Effects of π_{wc} 、 T_4 on performance parameters

温) T_3 的提高。事实上,循环增压比也随 π_{wc} 等比例提高,但与 T_4 无关。这符合热力循环性能随循环增压比、循环最高温度升高而升高的基本原理。

图 6(c)中的 T_3 与 T_4 存在 30~245 K 的温差,这就是烟气在波转子内部膨胀的温差。膨胀过程的温差随膨胀比增加,而膨胀比随压比增加,所以即使 T_4 保持不变, π_{wc} 的增加也引起 T_3 的增加。这就是波转子如何在较低的涡轮前温度条件下提高循环最高温度、进而提高发动机性能的。波转子自身则是凭借冷/热工质交替流动而自然形成的自冷却效应、以及自身结构的鲁棒性,承受比涡轮进口更高的流场温度。

基于对波转子压比和涡轮前温度的参数分析,提高波转子压比或涡轮前温度都可以提高发动机总体性能。其中,提高波转子压比是一种对

压比值。

表 4 在不同流量组合下,为达到预设性能指标,
对波转子压比的要求

Table 4 Requirements on the wave rotor pressure ratio
to achieve the pre-set performance metrics with
different flow combinations

φ_{FAE}	φ_{EGR}	波转子压比	
		热效率增量 指标要求	循环功增量 指标要求
0	0.2	1.64	1.63
0	0.1	1.49	1.48
0	0	1.41	1.41
0.1	0	1.57	2.02
0.2	0	1.81	

由表 4 可知,若不考虑 FAE 和 EGR 现象,波转子压比为 1.41 即可满足要求。若考虑 EGR 流和 FAE 流量比例的影响,则需要更高的波转子压比才能达到相应性能指标。在表 4 所示条件下,仅考虑 EGR 的现象($\varphi_{EGR}<0.2$)则波转子压比的修正量在 0.23 范围内,仅考虑 FAE 的现象($\varphi_{FAE}<0.2$)则波转子压比的修正量小于 0.61。一个例外情况是:当 FAE 流量比例达到 0.2 时,虽然对波转子压比作出 0.40 的修正量即可达到 3 个百分点的热效率增量指标,但无论如何提高波转子压比,都无法达到 20%的循环功增量指标。结合对图 7 热力循环模型的分析可知,这是因为 FAE 未经燃烧加热就膨胀、排出发动机,膨胀功小于压缩功的缘故。

6 结 论

空气、烟气在波转子内部形成的烟气回流(EGR)与空气排放(FAE)现象导致发动机的工质在波转子内部分股、汇合,并且参与波转子发动机的热力循环的不同热力过程,继而影响总体性能。本文考虑 EGR、FAE 现象的热力过程,针对空气/烟气工质分股形成的各股工质流量的不同组合,以 EGR 和 FAE 的流量比例为主要控制变量开展总体性能分析研究,得到如下结论:

1) 典型方案对比说明,EGR 和 FAE 流量比例不同的波转子发动机具有不同的循环功与热效率。

(1) 本文研究范围内,EGR 或 FAE 流量比例增加 0.1,最多可以导致热效率降低 0.9 个百

分点。由于波转子发动机总体设计原本不考虑 EGR 或 FAE 流量问题,所以需要针对 EGR 和 FAE 现象进行修正。

(2) EGR 或 FAE 流量比例对理想循环总体性能的影响程度比实际循环小。说明随着技术发展,提高各部件等熵效率也有利于缩小 EGR 或 FAE 流量比例对波转子发动机总体性能的影响。

2) 参数分析说明了 EGR 和 FAE 流量比例、波转子压比和涡轮前温度对总体性能各自具有不同的影响规律;而热力循环模型解释了参数影响规律的原理。

(1) EGR 或 FAE 流量比例的增加使波转子部件性能、波转子发动机总体性能降低。这是因为参与 EGR 或 FAE 现象的工质都具有“膨胀功小于压缩功”的特点。

(2) EGR 对总体性能的影响程度小于 FAE。这是因为 EGR 在燃烧室内部放热,等效于回收了一部分能量损失。

(3) 波转子压比、涡轮前温度的增加使循环增压比和循环最高温度增加,进而提升波转子发动机总体性能。

3) 基于参数影响规律及原理的分析,以一个基准发动机改型工作为例,提出了总体设计建议,即,针对具体的 EGR 和 FAE 的流量比例,适当地提高波转子压比,从而既可以避免改变基准发动机的涡轮前温度,又可以在考虑 EGR 和 FAE 现象的前提下保持波转子发动机性能。

参考文献:

[1] AKBARI P, NALIM R, MUELLER N. A review of wave rotor technology and its applications[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(10): 717-735.

[2] SHREEVE R P, MATHUR A. Proceedings of the 1985 ONR/NAVAIR wave rotor research and technology workshop [R]. Monterey, CA, USA: Naval Postgraduate School, 1985.

[3] SNYDER P H. Wave rotor demonstrator engine assessment[R]. Indianapolis, Indiana: Allison Engine Company, 1996.

[4] AKBARI P, NALIM R, MÜLLER N. Performance enhancement of microturbine engines topped with wave rotors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(1): 190-202.

[5] IANCU F, PIECHNA J, MÜLLER N. Basic design scheme for wave rotors[J]. Shock Waves, 2008, 18(5): 365-378.

[6] JONES S M, PAXSON D E. Potential benefits to commercial propulsion systems from pressure gain combustion

[R]. San Jose, CA, USA; the 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2013.

[7] SMITH B, POLANKA M, PAXSON D, et al. Scaling study of wave rotor turbo normalization of an internal combustion engine[R]. Atlanta, Georgia, USA; the 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2012.

[8] NALIM M R, LI H, AKBARI P. Air-standard aerothermodynamic analysis of gas turbine engines with wave rotor combustion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(5): 54501-54506.

[9] MATERANO G, SAVILL M. Preliminary design of a double expansion through flow wave rotor[R]. San Antonio, Texas, USA; ASME Turbo Expo, 2013.

[10] LEI Y, LI B, MULLER N, et al. Performance investigation of through flow wave rotor[J]. Journal of the Energy Institute, 2013, 86(4): 242-248.

[11] HU D, YU Y, LIU P. Enhancement of refrigeration performance by energy transfer of shock wave[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 309-318.

[12] LI J, GONG E, YUAN L, et al. Experimental investigation on flame formation and propagation characteristics in an ethylene fuelled wave rotor combustor[J]. Energy and Fuels, 2018, 32(2): 2366-2375.

[13] 产世宁, 刘火星, 胡晓煜. 四端口通流波转子的波系分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 410-417.

CHAN Shining, LIU Huoxing, HU Xiaoyu. Wave system analyses of four-port through-flow wave rotors[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 410-417. (in Chinese)

[14] CHAN S, LIU H, XING F. Defining the thermodynamic efficiency in a wave rotor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(11): 112601-112612.

[15] CHAN S, LIU H, XING F, et al. Wave rotor design method with three steps including experimental validation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(11): 111201-111213.

[16] GREENDYKE R B, PAXSON D E, SCHOBELIRI M T. Dynamic simulation of a wave-rotor-topped turboshaft engine[J]. Journal of Propulsion and Power, 2000, 16(5): 792-796.

[17] WELCH G E. Two-dimensional computational model for wave rotor flow dynamics[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1997, 119(4): 978-985.

[18] CHAN S, LIU H. Mass-based design and optimization of wave rotors for gas turbine engine enhancement[J]. Shock Waves, 2017, 27(2): 313-324.

(编辑: 叶 青、王碧琚)