

波转子对小型燃气涡轮发动机性能的影响

成本林^{1,2} 李建中^{1,2} 温泉² 巩二磊¹ 张堃元¹

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016; 2. 中航工业航空动力机械研究所, 株洲, 421002)

摘要:波转子是一种自冷却动压交换设备,具有提高各种发动机和机械的性能与运行特性的特有优势。本文建立基于波转子技术的小型燃气涡轮发动机热力循环分析模型。研究了压气机、涡轮压比、燃烧工作条件变化等5种热力循环方案情况下波转子技术对小型燃气涡轮发动机性能的影响。探讨波转子嵌入燃气涡轮发动机后导致燃烧室工作环境的变化规律。在相同压气机压比、相同涡轮进口温度热力循环方案情况下,波转子技术提高燃气涡轮发动机性能最高,获得了基于波转子技术小型燃气涡轮发动机最佳性能优化区和燃烧室工作环境变化规律。

关键词:小型燃气涡轮发动机;波转子;热力循环;性能

中图分类号:V235.22 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)04-0431-07

Impact of Wave Rotor on Performance of Small Gas Turbine Engine

Cheng Benlin^{1,2}, Li Jianzhong^{1,2}, Wen Quan², Gong Erlei¹, Zhang Kunyuan¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. China Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou, 421002, China)

Abstract: The wave rotor is a self-cooled dynamic pressure exchange machine that can improve the engine performance and fit diversified course. In this paper, the thermo-cycle analysis mode of a wave-rotor-topped small gas turbine engines is established. When the compressor, the turbine pressure ratio, and the turbine inlet temperature vary in the thermodynamic calculation according to the anticipated design objectives in the five considered cases, the influence of wave rotor on the performance of small gas turbine engines is investigated. The variable laws of wave rotor-applied combustor work condition is discussed. The best performance is obtained in the topped engine operates with the same compressor pressure ratio, inlet temperature and physical compressor like that of the baseline engine. The prime performance optimized region and the combustor work condition of the wave-rotor-topped small gas turbine engines are obtained.

Key words: small gas turbine engine; wave rotor; thermodynamic cycle; performance

波转子是一种自冷却动压交换设备,也称压力交换器或能量交换器,是利用不稳定的波对不同能量密度的气流进行能量交换的设备,具有提高各种

发动机和机械性能与运行特性的特有优势,波转子嵌入燃气涡轮发动机中,可大大提高发动机的效率和单位功率,减少燃油消耗、降低污染和减少燃油

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20093218120013)资助项目;中央高校基本科研业务费专项(NS2012017)资助项目。

收稿日期:2011-07-18; **修订日期:**2012-05-22

通讯作者:成本林,男,研究员,1965年生,E-mail:chengb1608@sina.com。

后勤保障,并且发动机仍可采用普通的材料和技术^[1-4]。

Welch 等人^[5-7]对小型(300~500 kW)和中型(2 000~3 000 kW)波转子涡轮发动机的性能进行了计算,验证了波转子技术能够提高发动机性能。Snyder 等人用罗·罗·艾利逊公司的250 涡轴发动机作为波转子技术的验证平台^[1],单位功率增加18%~20%,耗油率减少15%~22%。美国密歇根州立大学^[8-12]对几种热力循环波转子技术的好处进行评估,对30和60 kW两种微型涡轮发动机采用压比为1.8的波转子循环后的性能进行了研究,C-30总效率和单位功率提高33%,C-60提高25%,并分别对燃气涡轮发动机、制冷循环和超微型(基于MEMS)涡轮发动机中采用波转子技术的可行性进行了研究。上述研究工作验证了波转子技术具有显著提高航空发动机性能的巨大潜力。本文针对基于波转子技术小型燃气涡轮发动机的性能影响和燃烧室工作环境变化,开展5种不同热力循环方案下发动机性能影响规律研究,探讨燃烧室进出口参数变化规律。

1 热力循环计算模型

图1为嵌入波转子的小型燃气涡轮发动机工作流程,波转子与燃烧室并行放置,在波转子通道内,燃烧室排出的高温燃气与来源于压气机的新鲜空气在波转子内利用复杂波系快速交换能量,新鲜空气被压缩增压增温以后进入燃烧室组织燃烧,同时高温燃气在波转子内提前膨胀后排向涡轮做功。根据了解的波转子设计限制和参数的选择,波转子嵌入小型燃气涡轮发动机的方式主要包括如图2中5种热力循环方案,即,Case A:相同压气机,相同涡轮进口温度;Case B:相同总压比,相同涡轮进口温度;Case C:相同燃烧室;Case D:相同涡轮进口压力和温度;Case E:相同压气机,相同燃烧峰

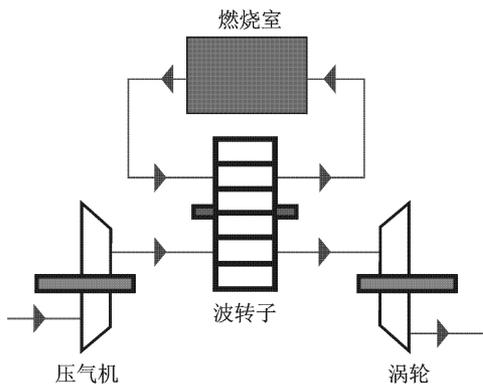


图1 基于波转子技术燃气涡轮发动机工作流程

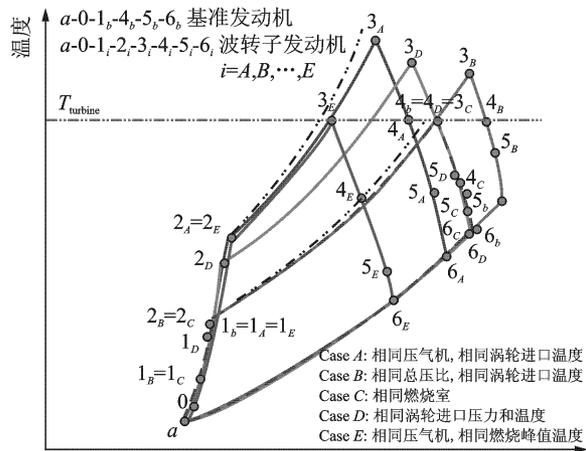


图2 波转子5种方案和基准发动机温熵图

值温度。

为了估算基于波转子技术小型燃气涡轮发动机性能增加程度和规律,选取某型涡喷发动机为基准发动机,应用热力学方法计算基于波转子技术小型燃气涡轮发动机和基准发动机的理论性能,建立简化的热力学循环计算模型,主要包括进气道模型、压气机模型、波转子模型、燃烧室模型、燃气涡轮模型、动力涡轮模型和性能分析模型。

(1) 进气道模型

滞止温度

$$T_{t0} = T_{ta} = T_a [1 + 0.5(\gamma_{air} - 1)Ma^2] \quad (1)$$

滞止压比

$$p_{t0}/p_a = (1 + \eta_D u_a^2 / 2C p_{air} T_a) \quad (2)$$

式中: p_a, T_a 分别为进气道进口压力和温度; Ma 为飞行马赫数。

(2) 压气机模型

出口温度

$$T_{t1} = T_{t0} + T_{t0} (\prod_C^{\frac{\gamma_{air}-1}{\gamma_{air}}} - 1) / \eta_C \quad (3)$$

出口压比

$$p_{t1}/p_a = \prod_C \cdot p_{t0}/p_a \quad (4)$$

式中: \prod_C 和 η_C 分别为压气机的压比和等熵压缩效率。

(3) 波转子压缩模型

出口温度

$$T_{t2} = T_{t1} + T_{t1} (p_{Rw}^{\frac{\gamma_{air}-1}{\gamma_{air}}} - 1) / \eta_{Wc} \quad (5)$$

出口压比

$$p_{t2}/p_a = p_{Rw} \cdot \prod_C \cdot p_{t0}/p_a \quad (6)$$

式中: p_{Rw} 和 η_{Wc} 分别为波转子的压比和压缩效率。

(4)燃烧室模型

出口温度

$$T_{t3} = T_{t4} + C p_{\text{air}} [T_{t1} (p_{Rtw}^{\gamma_{\text{air}}-1})^{\gamma_{\text{air}}} - 1] / \eta_{WC} / [(1+f) C p_{\text{gas}}] \quad (7)$$

出口压比

$$p_{t3}/p_a = \prod_{\text{comb}} \cdot p_{Rtw} \cdot \prod_C \cdot p_{t0}/p_a \quad (8)$$

式中: \prod_{comb} 和 f 分别为燃烧室的总压恢复系数和油气比。

(5)波转子排气模型

出口温度: T_{t4} (定值)。

出口压比

$$p_{t4}/p_a = \left\{ 1 - \frac{C p_{\text{air}} T_{t1}}{(1+f) C p_{\text{gas}} T_{t3}} \left[p_{Rtw}^{\frac{\gamma_{\text{air}}-1}{\gamma_{\text{air}}}} - 1 \right] \right\} / \eta_{WE} \eta_{WC} \cdot \prod_{\text{comb}} \cdot p_{Rtw} \cdot \prod_C \cdot p_{t0}/p_a \quad (9)$$

式中: η_{WE} 为波转子的膨胀效率。

(6)燃气涡轮模型

出口温度

$$T_{t5} = T_{t4} - C p_{\text{air}} (T_{t1} - T_{t0}) / [\eta_M (1+f) C p_{\text{gas}}] \quad (10)$$

出口压比

$$p_{t5}/p_a = p_{t4}/p_a \cdot [1 + (T_{t5} - T_{t4}) / (\eta_T \cdot T_{t4})]^{\gamma_{\text{gas}} / (\gamma_{\text{gas}} - 1)} \quad (11)$$

式中: η_M 和 η_T 分别为涡轮的机械传动效率和等熵效率。

(7)动力涡轮模型

出口压比

$$p_{t6}/p_a = p_6/p_0 \quad (12)$$

出口温度

$$T_6 = T_{t5} [1 + \eta_{dT} [(p_{t6}/p_{t5})^{\gamma_{\text{gas}}-1})^{\gamma_{\text{gas}}} - 1]] \quad (13)$$

式中: p_0 为喷管出口当地压力。

(8)性能分析模型

功率

$$ST = \eta_M \eta_T (1+f) C_P T_{t4} [1 - (p_{t6}/p_{t4})^{\gamma_{\text{gas}}-1})^{\gamma_{\text{gas}}} - 1] / C_P T_{t0} (\prod_C^{\gamma_{\text{air}}-1})^{\gamma_{\text{air}}} - 1 / \eta_C \quad (14)$$

耗油率

$$SFC = f/ST \quad (15)$$

总效率

$$\eta_0 = ST/f \cdot h_{PR} \quad (16)$$

式中: h_{PR} 为燃料的热值。

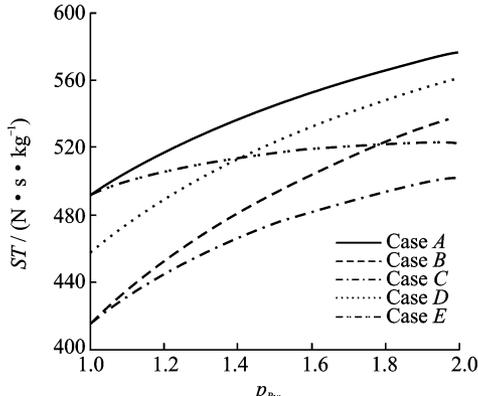
2 计算结果及分析

2.1 波转子压比对发动机性能和燃烧室工作环境的影响

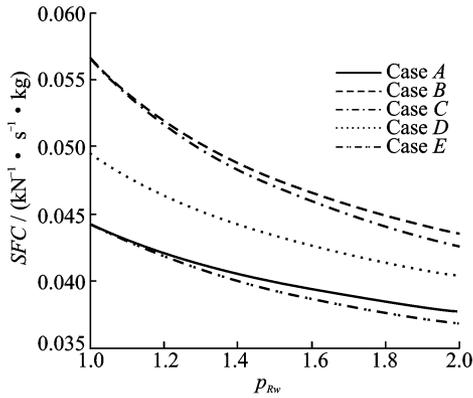
波转子压比 $p_{Rtw} = 1$ 时为基准发动机的性能参

数,随着波转子压比的增加,其设计难度越来越大,同时带来较多的技术问题,本文选取波转子最大压比为 $p_{Rtw} = 2$ 。图3给出了波转子嵌入燃气涡轮发动机5种方案热力循环计算结果,从图中可以看到,随着波转子压比的增加,发动机比推 ST 和总循环效率 η_0 都是增加的,耗油率 SFC 都是降低的,其中Case A方案的比推最大,耗油率略高于Case E方案,总循环效率略低于Case E方案,发动机循环总效率和比推最大增幅达17%,耗油率最大减幅达14.5%。Case E方案除了比推略低外,总循环效率和耗油率均是最佳的,Case B和Case C两种方案也能够提高发动机的性能,但提高幅度较小,Case D介于5种方案中间阶段。另外,随着波转子压比的增加,发动机循环总效率和比推的增加趋势是一致的,并且增加的斜率越来越小,同时耗油率减小的趋势也趋于平缓,这说明波转子的压比增加带来的收益越来越小。因此,波转子压比的选择在基于波转子技术燃气涡轮发动机设计过程中是非常关键的,另外,将波转子嵌入燃气涡轮发动机以后会带来结构上的复杂,对发动机性能的提高略有影响,需要选择合适的波转子压比弥补不利影响,确保波转子技术的应用能够提高基准发动机的性能。

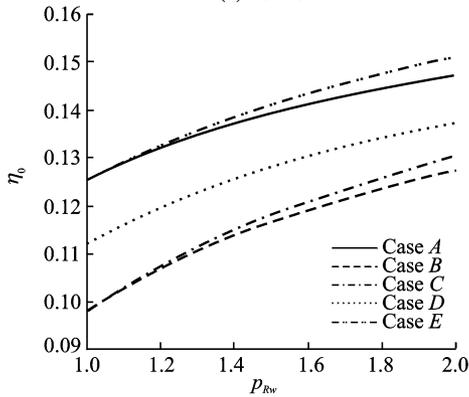
比较5种方案的优劣除了提高性能方面外,还应考虑结构、经济性等方面影响。如图4所示,给出了5种方案情况下燃烧室进口参数的变化规律。Case B因为总压比相同,燃烧室在相同压力条件工作,但是,由于波转子膨胀功导致燃烧释放热量增加,进而使得燃烧循环温度增加,燃烧室需要适当改进。压气机和涡轮都将以低压比条件工作,减少压气机和涡轮的加工成本。这种情况除了增加推力以外,还会导致涡轮出口温度,即排气温度高于基准发动机,因此,如果增加回热器,此种情况将极具吸引力。Case C燃烧室相同导致发动机总压比、燃烧室进出口温度相同,波转子的应用降低了压气机和涡轮的压比,同时涡轮进口温度低于基准发动机,可以使用低热抗材料,减少了成本。但是,此种情况的性能增加几乎可以忽略。Case D燃烧室的压力和燃烧循环温度都比基准发动机高,但低于Case A的情况,燃烧室的结构和喷射系统改进要求较小。由于波转子的应用,压气机要求产生的压比低于基准发动机,同时涡轮的压比也低,减少成本。Case E与Case A相似,但是,燃烧循环温度被基准发动机涡轮进口温度限制,不增加燃烧室附加热载荷,总压比与Case A相同并高于基准发动机,



(a) 比推



(b) 耗油率

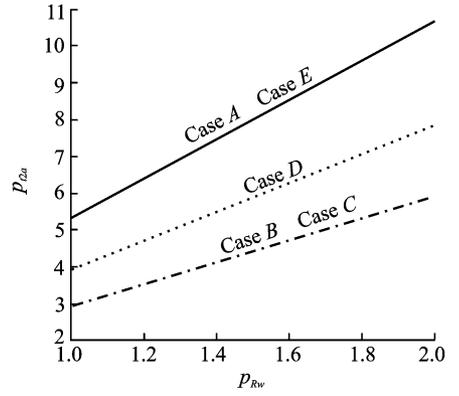


(c) 总循环效率

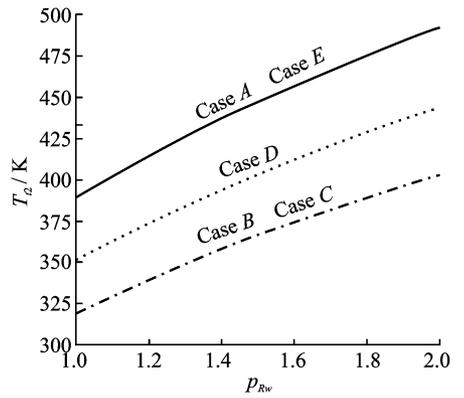
图3 发动机性能参数随波转子压比变化规律

燃烧室热量增加低于基准发动机,由于波转子的压缩功在燃烧之前增加到流体中,与基准发动机使用相同压气机,涡轮工作压比稍高,涡轮进口温度低于基准发动机,减少压气机和涡轮成本。

波转子嵌入燃气涡轮发动机以后能够显著提高发动机综合性能,但是,同时也改变了基准发动机各部件的工作环境,选择提高发动机性能最佳方案Case A为研究对象,研究发动机各部件在使用波转子以后的工作环境,为了方便起见,各状态点的压比指的是该状态点压力与a状态点的压力比值,即 p_{i1a} , $i=1,2,3,4$ 。图5给出了压气机出口(p_{11a} , T_{11})、波转子新鲜混气出口(p_{12a} , T_{12})、燃烧室



(a) 燃烧室进口压比



(b) 燃烧室进口温度

图4 发动机燃烧室进口参数随波转子压比变化规律

出口(p_{13a} , T_{13})、波转子高温燃气出口(p_{14a} , T_{14})等状态点的压力和温度随着波转子压比增加的变化规律,在热力循环计算过程中不考虑部件之间流道损失,因此,波转子新鲜混气出口的参数即为燃烧室进口参数,波转子高温燃气出口参数即为涡轮进口温度参数。此方案中,压气机的压比保持不变,基准发动机压气机可以继续使用,并提供近似相等的质量流量。通过波转子的压缩,燃烧室工作压力显著增加,如图5(a)中 p_{12a} 曲线所示,导致燃烧室的结构和燃油喷射系统需要改进。基准发动机涡轮进口压力为5.0688,随着波转子压比的增加, p_{14a} 也增加,并且波转子压比小于1.11时, $p_{14a} < p_{11a}$,波转子压比大于1.11时, $p_{14a} > p_{11a}$,因此,波转子的气动力学设计不仅弥补了燃烧室的压力损失,而且增加了涡轮进口压力,提高了发动机的推进性能。从图5(b)中可以看到, T_{12} 和 T_{13} 增加的幅值和趋势基本相当,即燃烧室中热量增加与基准发动机相同(温升相同),燃烧室进口温度增加对燃烧是有利的,但是,燃烧室内油气分布和燃烧组织需要适当调整,并且,由于波转子内的能量交换,使得燃烧室进口温度增加,导致燃烧循环温度高于基准发动机,要求燃烧室能够承受附加热量。另外,因为压气机

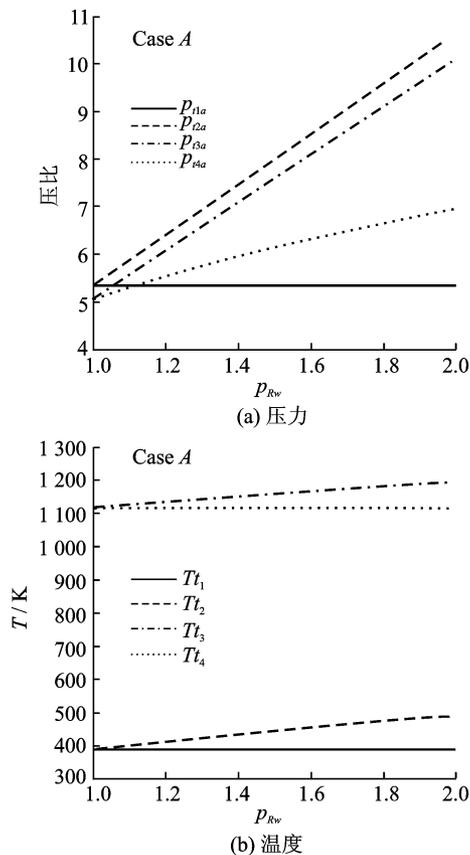


图5 发动机热力学参数随波转子压比变化规律

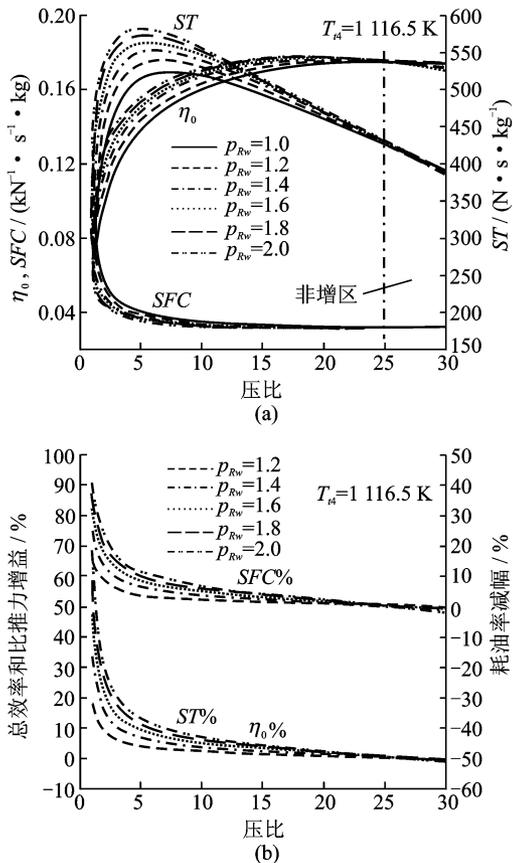


图6 总效率、比推和耗油率随压气机压比变化规律

有改变, 涡轮进口压力增加使得涡轮进口体积流量减小, 可能要求涡轮适当改变。

2.2 压气机压比等参数对发动机性能和燃烧室工作环境的影响

比较5种方案可以发现, Case A 方案综合指标最高, 下面针对 Case A 方案研究基于波转子技术燃气涡轮发动机性能的主要影响因素。

压气机的压缩能力影响发动机的性能, 图6给出了发动机总效率、比推和耗油率随着压气机压比的变化规律, 从图中可以看到, $p_{Rw} = 1$ 对应的是基准发动机, 当压气机压比在1~25范围内, 总效率、比推和耗油率都是增加的, 同时随着波转子压比的增加各性能参数也增加, 并且不同性能参数最大值对应的压气机压比也是不相同的。如比推对应压比为5左右, 总效率和耗油率对应的是20左右, 压气机压比继续增加时, 总效率、比推和耗油率低于基准发动机, 存在非增加区域。从图6(b)中还可看出, 随着压气机压比的增加, 总效率和比推的增幅逐渐降低, 耗油率的减幅也降低, 在压比达到15以后趋于平缓。

图7给出了波转子压比 $p_{Rw} = 1.8$ 时, 发动机各部件工作参数随压气机压比的变化规律, 从图中可以看到, 随着压气机压比的增加, 燃烧室工作压力

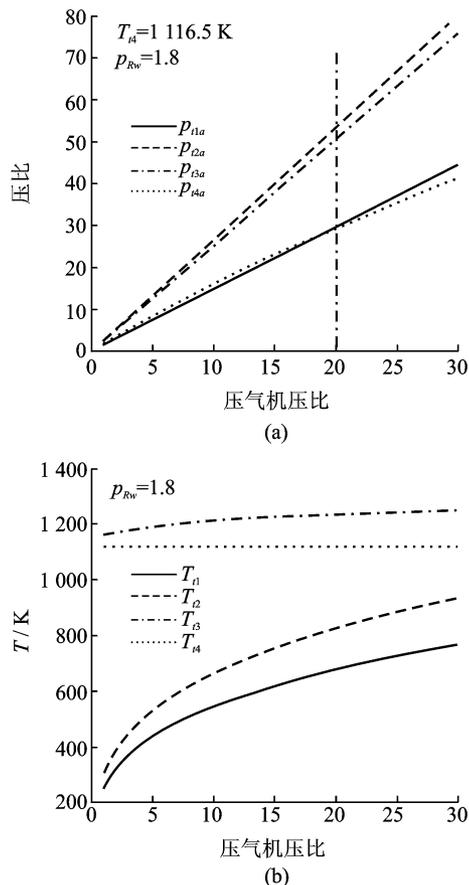


图7 发动机热力学参数随压气机压比变化规律

p_{t2a} 显著增加,超出了燃烧承载范围,燃烧室的结构和喷油系统都需要较大改进,同时,燃烧室进口温度 T_{t2} 显著增加,因为涡轮前温度为定值,燃烧室的最大循环温度变化不大,这使得燃烧室的温升随着压气机的压比增加而降低,这违背了燃烧室高温升的发展趋势。压气机压比在1~20范围内,涡轮进口压力 $p_{t4a} > p_{t1a}$,随着压气机压比继续增加, $p_{t4a} < p_{t1a}$ 。

发动机能否在全工况下满足性能要求是考核发动机性能优劣的一个重要指标,如飞行马赫数、飞行高度等参数影响。图8(a)给出了Case A方案发动机主要性能参数随飞行马赫数的变化规律,从图中可以清晰看到,随着飞行马赫数的增加,发动机比推降低、耗油率增加、总循环效率增加,但在0~2.4Ma范围内,波转子的应用能够有效提高发动机比推和总效率,减少耗油率,波转子压比越高增加幅度越大,随着飞行马赫数进一步增加,波转子发动机的性能将低于基准发动机,图中竖虚线右边区域为非增区。图8(b)中给出了波转子压比 $p_{Rw}=1.8$ 时,不同飞行高度对应的发动机性能随马赫数的变化规律,竖虚线右侧发动机比推和总效率急剧下降,耗油率

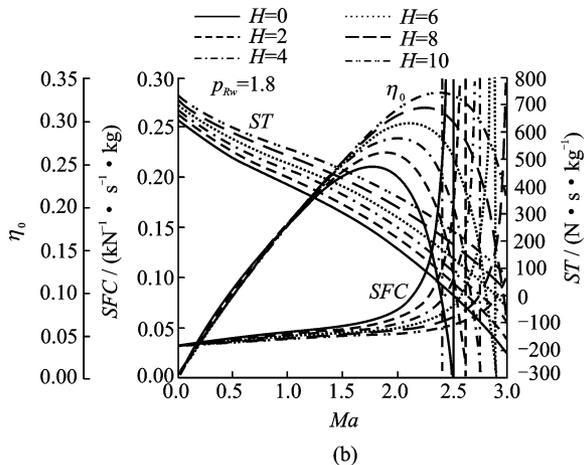
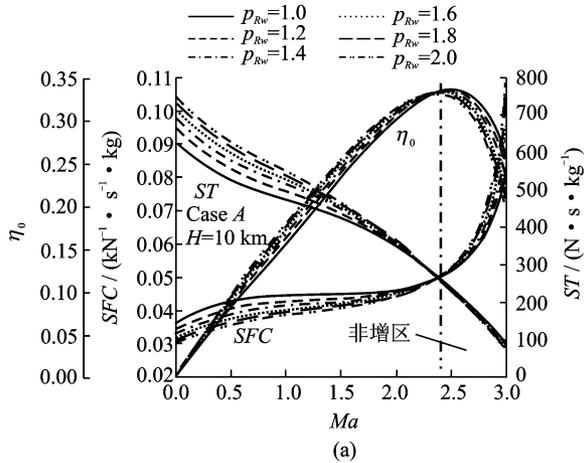
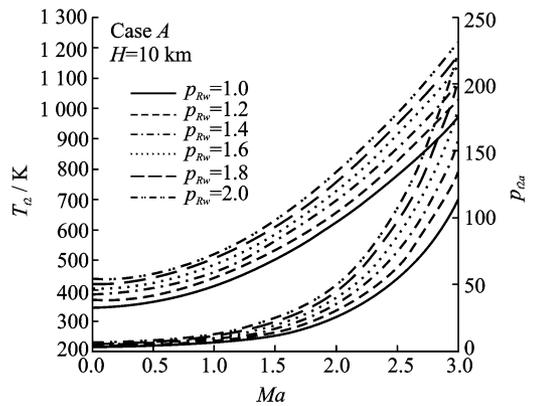


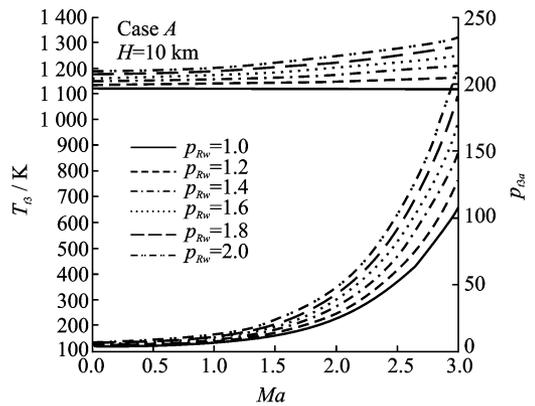
图8 发动机性能参数随飞行马赫数变化规律

急剧增加,发动机性能显著恶化。因此,波转子技术适应于低马赫数飞行的飞行器动力装置。

图9给出了Case A方案波转子发动机在飞行高度10 km时,不同波转子压比条件下,燃烧室进出口温度随飞行马赫数的变化规律,从图中可以看到,随着马赫数的增加燃烧室进出口温度都是增加的,由于Case A保持涡轮进口温度不变,所以燃烧室的温升是随着马赫数而减小的,并且波转子压比越高,燃烧室工作环境变化越剧烈,燃烧室的结构和燃油喷射系统需要优化匹配。因此,波转子技术的应用有效地提高了发动机的性能,同时也改变了发动机各部件的工作环境。如燃烧室的结构需要优化匹配,并且波转子和压气机存在最佳工作范围,即波转子技术适应于低压气机压比燃气涡轮发动机。



(a) 燃烧室进口



(b) 燃烧室出口

图9 燃烧室进出口参数随飞行马赫数变化规律

3 结论

本文建立了基于波转子技术小型燃气涡轮发动机热力循环分析模型,分析了5种不同热力循环方案下发动机性能影响规律,探讨了发动机燃烧室工作环境变化规律,研究了压气机压比等参数影响发动机性能和燃烧室工作环境。

(1)随着波转子压比的增加,发动机比推和总循环效率都增加,耗油率都降低,其中Case A方案的比推最大,耗油率略高于Case E方案,总循环效率略低于Case E方案,发动机循环总效率和比推最大增幅达17%,耗油率最大减幅达14.5%。同时,改变了基准发动机各部件的工作环境,燃烧室进口温度增加对燃烧是有利的,但是,燃烧室内油气分布和燃烧组织需要适当调整,并且,由于波转子内的能量交换,使得燃烧室进口温度增加,导致燃烧循环温度高于基准发动机,要求燃烧室能够承受附加热量。另外,因为压气机没有改变,涡轮进口压力增加使得涡轮进口体积流量减小,可能要求涡轮适当改变。

(2)当压气机压比在1~25范围内,总效率、比推和耗油率都是增加的,不同性能参数最大值对应的压气机压比不同,随着压气机压比的增加,总效率和比推的增幅逐渐降低,耗油率的减幅也降低,在压比达到15以后趋于平缓。压气机压比继续增加至大于25时,总效率、比推低于基准发动机,存在非增加区域,耗油率高于基准发动机。随着压气机压比的增加,燃烧室工作压力显著增加,超出了燃烧承载范围,燃烧室的结构和喷油系统都需要较大改进,同时,燃烧室进口温度显著增加,这使得燃烧室的温升随着压气机的压比增加而降低,违背了燃烧室高温升的发展趋势。

(3)随着飞行马赫数的增加,发动机比推降低,耗油率增加,总循环效率增加,但在0~2.4Ma范围内,波转子的应用能够有效提高发动机比推和总效率,减少耗油率,波转子压比越高增加幅度越大,随着飞行马赫数增加至大于2.4时,波转子发动机的性能将低于基准发动机,存在非增区。

参考文献:

[1] Welch G E, Paxson D E, Wilson J. Wave-rotor-enhanced gas turbine engine demonstrator[R]. NASA/TM-1999-209459/ARL-TR-2113,1999.

- [2] Meyer A. Recent development in gas turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering,1947,69(4):273-277.
- [3] Kentfield J A C. Wave rotors and highlights of their development[R]. AIAA 1998-3248,1998.
- [4] 胡晓煜.波转子增压循环发动机技术[J].燃气涡轮试验与研究,2005,18(1):57-62.
Hu Xiaoyu. Wave rotor topping cycle gas turbine engine technology[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2005,18(1):57-62.
- [5] Welch G E, Jones S M, Paxson D E. Wave rotor-enhanced gas turbine engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1995,119(2):469-477.
- [6] Welch G E. Macroscopic balance model for wave rotors[J]. Journal of Propulsion and Power,1996,13(4):508-516.
- [7] Welch G E. Two-dimensional computational model for wave rotor flow dynamics[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1995,119(4):978-985.
- [8] Akbari P, Muller N. Performance improvement of small gas turbines through use of wave rotor topping cycles[R]. ASME-GT-2003-38772,2003.
- [9] Akbari P, Kharazi A A, Muller N. Utilizing wave rotor technology to enhance the turbo compression in power and refrigeration cycles[R]. ASME-IMECE-2003-44222,2003.
- [10] Akbari P, Muller N. Performance improvement of recuperated and unrecuperated microturbines using wave rotor machines[R]. Kyoto: ASME CIMAC Congress,2004.
- [11] Elharis T M, Wijeyakulasuriya S D, Razi Nalim M. Analysis of deflagrative combustion in a wave-rotor constant-volume combustor[R]. AIAA 2011-583,2011:1-14.
- [12] Dempsey E, Muller N, Akbari P, et al. Performance optimization of gas turbines utilizing four-port wave rotors[R]. AIAA 2006-4152,2006:1-14.