

文章编号: 1000-8055(2024)01-20220127-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220127

射流预冷不同因素对涡扇发动机性能的影响

王佳美, 郭迎清, 于华锋
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为了研究射流预冷下涡扇发动机的性能以及稳定性表现, 分别考虑射流预冷导致的进气道掺混换热、截面工质热物理性质的修正以及部件特性修正这三种因素, 对涡扇发动机的稳态性能进行了数值模拟。计算结果表明: 射流预冷下发动机推力的大幅增长来自于进气流量的增加, 其中掺混换热是引起进气流量增加的直接因素, 而工质热物理性质和部件特性的变化则导致发动机的推力下降, 高水气比下, 受进气流量增加的影响, 射流预冷仍能大范围的提高发动机的推力水平。进气道掺混换热使得风扇更为逼近喘振点, 而随着水气比的增加, 风扇和高压压气机的稳定性均有所回升。

关 键 词: 射流预冷(MIPCC); 掺混换热; 工质热物理性质; 部件特性; 推力; 喘振裕度
中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Effects of different influencing factors under mass injection and pre-compressor cooling on turbofan engine performance

WANG Jiamei, GUO Yingqing, YU Huafeng

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study the performance and stability of turbofan engine under mass injection and pre-compressor cooling (MIPCC), the steady-state performance of turbofan engine was numerically simulated by considering three factors: inlet mixing heat exchange, modification of thermophysical properties of working fluid and modification of component characteristics. The calculation results showed that the thrust of engine under MIPCC greatly increased due to the increase of intake flow, in which the inlet mixing heat exchange is the direct factor contributing to the increase of intake flow, while the changes of thermophysical properties of working fluid and component characteristics lead to the decrease of the thrust of engine. Even if with high water-air ratio, the thrust level can still be greatly enhanced by intake flow. Inlet mixing heat exchange can make fan work closer to the surge point, however, with the increase of water-air ratio, the stability of fan and high-pressure compressor both rose.

Keywords: mass injection and pre-compressor cooling (MIPCC); mixing heat exchange; thermophysical properties; component characteristics; thrust; surge margin

近几十年来,随着高性能推进技术的需求发展,对高超声速飞行器的研究,成为各国军事研发的关键技术之一,涡轮基组合循环(turbine

based combined cycle, TBCC)发动机因能充分利用涡轮发动机和冲压发动机各自的航程优势^[1],实现大范围的跨声速变循环工作,得到各主要军

收稿日期: 2022-03-13

基金项目: 国家科技重大专项基础研究项目(J2019-V-0003)

作者简介: 王佳美(1995—),女,博士生,主要从事发动机总体性能计算方面的研究。E-mail: wangjiamei@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 郭迎清(1964—),男,教授,博士,主要从事发动机控制方面的研究。E-mail: yqguo@nwpu.edu.cn

引用格式: 王佳美, 郭迎清, 于华锋. 射流预冷不同因素对涡扇发动机性能的影响[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 20220127. WANG Jiamei, GUO Yingqing, YU Huafeng. Effects of different influencing factors under mass injection and pre-compressor cooling on turbofan engine performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 20220127.

事大国的重点研究。由于常规的涡轮发动机在马赫数大于 2.5 飞行时, 发动机性能会随着进气滞止温度的增加而迅速恶化^[2], 可靠性也大幅降低, 而使得其难以到达 TBCC 发动机变循环工作的马赫转级点。为了扩大涡轮发动机的马赫工作范围, 解决 TBCC 发动机模态转换时的推力鸿沟问题, 一种非常有效的方法是射流预冷(mass injection and pre-compressor cooling, MIPCC)。

MIPCC 这一概念最先由美国 MSE 技术公司提出^[3], 即通过在常规涡轮发动机的风扇或压气机之前加装液体喷射装置, 将冷却液(水或水和氧化剂的混合液)喷射至进气道的来流中, 蒸发冷却进气道中的气流。发动机进气温度的降低, 不仅使得发动机在高马赫下仍能保证其耐温极限^[4], 同时, 换算转速的增加以及在一定的燃烧室出口温度极限下可用燃油量的增加, 能在一定程度上提高发动机的增压^[5]和增温^[6]比, 进而实现涡轮发动机的推力增益。

早在 20 世纪 50 年代, 美国就已经开始了喷水预冷增推的研究^[7-8], Wilcox 和 Trout^[9]开发了湿空气的焓熵图以及热力学性质图表, 以此来计算进气道喷水之后压气机性能和涡喷发动机推力的变化。Hill^[10]采用简化分析方法, 研究了进口冷却剂喷射对轴流压气机性能的影响, 结果表明, 冷却剂的蒸发改变了压气机各级的功分配和理想压缩功。Sanaye 等、Meacock 等和 Novelo 等^[11-14]则将压气机一维性能计算与液滴蒸发过程相结合, 研究了液滴尺寸对压气机性能的影响, 并将其应用到多转子燃气轮机的性能分析上, 研究发现, 注水可以显著提高多转子燃气轮机的空气质量流量和压比, 液滴直径越小, 对射流蒸发越有利。除此以外, 美国在 20 世纪 70 年代开展的 Peace Jack 计划^[15]以及 21 世纪初的快速响应小载荷低成本运载(RASCAL)项目^[16]中分别对加装射流预冷的 F-4E 飞机和 F100 发动机进行了试验测试, 测试结果证实了射流预冷技术在强化动力推进上的实用性。

国内对射流预冷技术的研究起步较晚, 进入 21 世纪, 射流预冷才得到发动机研制单位和科研机构的深入研究^[17-18]。商旭升等和李成等^[19-20]建立了射流预冷的影响模型评估其对发动机整机性能的影响, 证明了射流预冷能够扩展发动机的飞行马赫。刘月玲等、刘旭峰等^[21-22]和罗佳茂等^[23]对射流预冷装置的温降特性进行了试验和数值仿真, 计算结果表明, 进气道出口蒸发率随来流温

度的增加而升高, 但随水气比的增加而降低。同时, 安利平等^[24]发展了基于进气道和压气机的气液两相流一体化分析方法, 对压气机的湿压缩特性进行了研究。

目前这些工作大多基于射流预冷的整体影响进行考虑, 而很少分析射流预冷导致的不同因素对发动机的不同影响作用。为了探索射流预冷对发动机性能以及稳定性表现的作用机理, 本文分别考虑射流预冷导致的进气道掺混换热、截面工质热物理性质的修正以及部件特性修正这三种因素, 通过单个影响因素下双轴涡扇发动机的数值模拟计算, 对各因素作用下射流预冷对涡扇发动机的性能及稳定性表现进行分析, 所得结果为进一步射流预冷控制规律的研究提供了理论参考。

1 射流预冷的简化计算模型

假设射流预冷喷入的液态水在进入涡扇发动机的风扇前已经完全蒸发。射流预冷除了引起进气道气流温度降低以外, 原本的干工质由于混入水蒸气, 含湿工质的比热比 γ 、气体常数 R 、比定压热容 c_p 等热物理性质参数也会因此发生变化。一方面, 热物理性质参数的变化直接影响了发动机各部件热力过程的计算; 另一方面, 水蒸气的存在也改变了原来干工质下的部件特性。旋转部件中受 γ 和 R 的影响, 其进口气流的轴向马赫数 Ma_a 和周向马赫数 Ma_u 发生变化^[25]:

$$Ma_a \frac{\pi(Ma_a)}{\sqrt{\tau(Ma_a)}} = \frac{W \sqrt{T_t}}{p_t A} \cdot \sqrt{\frac{R}{\gamma}} \quad (1)$$

$$Ma_u \sqrt{\tau(Ma_a)} = \frac{\pi D n}{60 \sqrt{T_t}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma R}} \quad (2)$$

式中 p_t 、 T_t 分别为旋转部件进口的总压和总温, D 为进口直径, A 为进口流道截面面积, n 为转子转速, $\pi(Ma)$ 和 $\tau(Ma)$ 为压力和温度的气动函数。燃烧室中则是由于含湿工质的 c_p 比干工质的大, 使得相同供油量下, 湿工质的温升小于干工质, 从而改变了插值得到的燃烧效率。

在射流预冷的简化计算模型中, 除考虑进气温降以外, 还需对含湿工质的热物理性质以及热物理性质改变引起的部件特性的变化作出修正。以下对这三个方面的计算进行介绍。

1.1 掺混换热计算

射流预冷装置中的热力过程可简化为如图 1 所示的结构图^[20], 不饱和态的水在热交换器中通

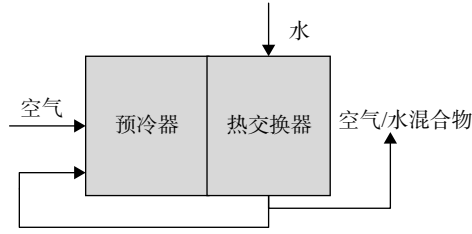


图 1 MIPCC 结构示意图

Fig. 1 Simplified structure of MIPCC device

过与来流进行热交换转化为过热蒸汽,在射流冷却器中通过对流掺混来冷却来流总温。

进气道中的气流动经射流预冷装置的过程中,满足以下能量守恒方程:

$$q_{m,water}(h_{water,out} - h_{water,in}) = q_{m,air}(h_{air,in} - h_{air,out}) \quad (3)$$

式中 q_m 为质量流量, h 为焓值,下标 air、water 分别表示来流干空气和喷射的冷却水,下标 in、out 分别表示射流预冷装置的进出口。水物质的焓值可直接由国际通用的 IAPWS-IF97(International Association for the Properties of Water and Steam, IAPWS)公式^[26]计算得到。在进气道中进行射流预冷换热计算时,发动机模型中的进气道流量是未知的,此时将上式变形为:

$$r_{wa}(h_{water,out} - h_{water,in}) = h_{air,in} - h_{air,out} \quad (4)$$

式中 r_{wa} 为喷射水气比, $r_{wa} = q_{m,water} / q_{m,air}$ 。假设液态水在风扇入口前全部蒸发时, r_{wa} 等同于比湿度。在一定的风扇进口温度的要求下,射流预冷装置之后的冷水量以水气比 r_{wa} 的形式传递。

1.2 射流预冷对工质热物理性质的影响

射流预冷喷水导致的湿工质 c_p 、 γ 以及 R 等热物理性质的变化,反映在部件变比热热力计算过程中,主要是对部件截面含湿气体常数 R_{mix} 、焓值 h_{mix} 以及熵值 s_{mix} 按照质量加权的方式进行修正:

$$R_{mix} = \frac{R_{air} + r_{wa} \cdot R_{water} + r_{fa} \cdot R_{fuel}}{1 + r_{wa} + r_{fa}} = \frac{(1 + r_{fa})R_{gas} + r_{wa} \cdot R_{water}}{1 + r_{wa} + r_{fa}} \quad (5)$$

$$h_{mix} = \frac{h_{air} + r_{wa} \cdot h_{water} + r_{fa} \cdot h_{fuel}}{1 + r_{wa} + r_{fa}} = \frac{(1 + r_{fa})h_{gas} + r_{wa} \cdot h_{water}}{1 + r_{wa} + r_{fa}} \quad (6)$$

$$s_{mix} = \frac{s_{air} + r_{wa} \cdot s_{water} + r_{fa} \cdot s_{fuel}}{1 + r_{wa} + r_{fa}} = \frac{(1 + r_{fa})s_{gas} + r_{wa} \cdot s_{water}}{1 + r_{wa} + r_{fa}} \quad (7)$$

式中,下标 gas 和 mix 分别表示干燃气和含湿的空气或燃气, r_{fa} 表示油气比。

1.3 射流预冷对部件特性的影响

含湿工质热物理性质的改变进一步导致了旋转部件和燃烧室特性的变化,若直接对部件特性做含湿度的修正,则在不同含湿度下都需要一套对应的部件特性。不同湿度条件下由地面试验给出的部件特性虽然更为准确,但对试验装备的要求很高,同时也增加了试验成本。从工程实际出发,借助相似分析,可以将对含湿情况下部件特性的修正转化为对部件进口相似参数的修正,进而直接由原本的干工质部件试验特性完成部件插值,进行不同含湿度工质的发动机整机计算。

在相似分析中,假设干工质和含湿工质下发动机各部件处于相似工作状态,则含湿前后的 Ma_a 和 Ma_u 不会发生变化,由 $Ma_{a,dry} = Ma_{a,wet}$ 可以推导得到:

$$q_{m,cor,wet} = q_{m,cor,dry} \frac{(\sqrt{R/\gamma})_{dry}}{(\sqrt{R/\gamma})_{wet}} \quad (8)$$

式中下标 dry 和 wet 分别代表干工质和湿工质。同时,由 $Ma_{u,dry} = Ma_{u,wet}$ 可以推导得到:

$$n_{cor,dry} = n_{cor,wet} \frac{(\sqrt{\gamma R})_{dry}}{(\sqrt{\gamma R})_{wet}} \quad (9)$$

在以部件法搭建起来的发动机整机模型中,喷水之后各部件之间都是以湿参数进行传递的,此时,需要将部件特性插值模块输入的湿换算参数转化为相应的干换算参数,并将插值得到的干换算参数再次转化为湿换算参数,进行部件热力过程的计算并传递到下一个部件。当旋转部件是以换算转速 $n_{cor,wet}$ 以及坐标 β 进行插值时,只需将 $n_{cor,wet}$ 按照式(9)转化为 $n_{cor,dry}$,并将插值得到的 $q_{m,cor,dry}$ 按照式(8)转化为 $q_{m,cor,wet}$,此后的部件热力过程仍以 $n_{cor,wet}$ 和 $q_{m,cor,wet}$ 进行计算。对于以换算转速 $n_{cor,wet}$ 和相似功 $(\Delta h/T_t)_{wet}$ 插值的旋转部件,除了换算转速,还需对相似功进行从湿参数到干参数的转化:

$$(\Delta h/T_t)_{dry} = (\Delta h/T_t)_{wet} \frac{c_{p,dry}}{c_{p,wet}} \quad (10)$$

燃烧室中温升的变化同样也受含湿比热的影响,因此在利用温升 $\Delta T_{t,wet}$ 以及进口压力插值得到燃烧室效率时需要将温升做如下转化:

$$\Delta T_{t,dry} = \Delta T_{t,wet} \frac{c_{p,wet,av}}{c_{p,dry,av}} \quad (11)$$

式中下标 av 表示进出口平均值。利用 $\Delta T_{t,dry}$ 插值得到燃烧室的效率,即进行了燃烧室部件特性的修正,插值以后的热力循环计算仍用 $\Delta T_{t,wet}$ 进行参数传递。

2 结果与讨论

2.1 分别考虑三种影响因素下的发动机稳态性能仿真与分析

以某型涡扇发动机为例,假定其飞行轨迹为如图 2 所示的 40 kPa 等动压线(图中 H 和 Ma 分别表示飞行高度和马赫数),对射流预冷前后的发动机的稳态性能进行计算。为了使发动机在各个轨迹点上获得最大推力^[27],采取如下控制规律:主燃烧室燃油量保持高压相对物理转速 98% 不变,假设主燃烧室温度在此过程中未超限;调节尾喷管喉部面积保持恒定高低压转子转差,尾喷管出口始终处于完全膨胀状态;加力燃烧室供油保持最大加力温度。

图 3 给出了保持射流预冷后风扇进气总温 $T_{t,2}$ 在 350 K 下分别考虑掺混换热(Cond 1)、工质热物理性质(Cond 2)、部件特性变化(Cond 3)的影响时发动机的主要性能参数相对于未预冷时随着对应轨迹点下水气比变化的对比结果,图标中下标 re 表示相对值。

由图 3 可以看到,射流预冷之后,发动机燃烧室出口温度 $T_{t,4,re}$ 相较未预冷时下降,风扇和高压压气机进气流量 $q_{m,1,re}$ 、 $q_{m,2,re}$ 以及推力 $F_{n,re}$ 均大幅增加,耗油率 $c_{sf,re}$ 以及尾喷管喉部面积 $A_{8,re}$ 则在略微降低之后迅速增加。对比图 3(a)和图 3(f)可知,射流预冷之后发动机的出口速度 $v_{9,re}$ 虽然也在增加,但进气流量的增加是推力增加的主要

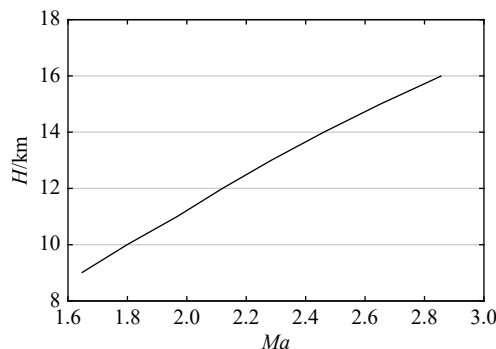


图 2 发动机飞行轨迹

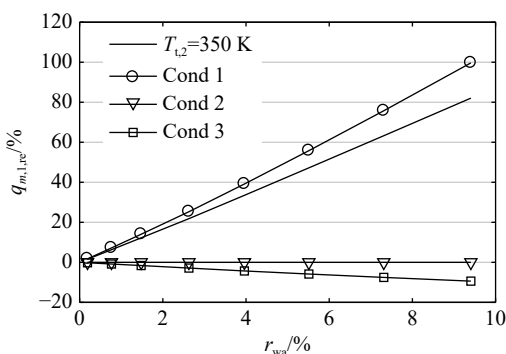
Fig. 2 Flight trajectory of engine

原因。其中进气道的掺混换热是引起高低压转子流量增加的直接因素,而工质热物理性质和部件特性的修正则使得发动机的推力下降。

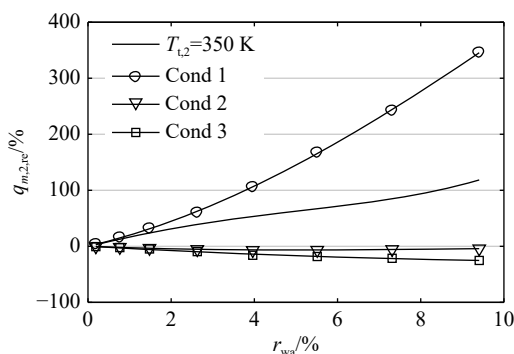
对各因素下发动机的主要参数变化进行详细分析如下:

1) 进气道的掺混换热降低了来流的温度,使得空气的密度增加,进而增加了发动机的进气流量。在保持高低压转速为定值的控制规律下,工质流量的增加也使得与之相对应的主燃烧室的供油量 $q_{m,f,re}$ (图 3(c)) 和加力燃烧室的供油量 $q_{m,f,ab,re}$ (图 3(d)) 随之增加。同时在保持转速不变时掺混换热使得高低压转子的做功能力增加,风扇以及高压压气机的压比 $r_{p,f,re}$ 、 $r_{p,c,re}$ 增加(图 4(a)~图 4(b)), $v_{9,re}$ 也随之增加, $F_{n,re}$ 大幅提高, $c_{sf,re}$ 降低, $A_{8,re}$ 则由于低压转子做功能力的增加而减小。

2) 工质热物理性质的变化,尤其是含湿之后定压比热的增加使得压缩部件中工质的压缩性降低,涡轮部件中工质的做功能力则增加。同时,定压比热的增加也会引起相同供油下 $T_{t,4,re}$ 的下降。在低马赫下水气比 r_{wa} 含量较低时, $T_{t,4,re}$ 的下降很小,涡轮部件做功能力的增加起主要作用,因此, $q_{m,f,re}$ 略微下降。而随着 r_{wa} 的增加, $T_{t,4,re}$ 的



(a) 风扇进气流量



(b) 高压压气机进气流量

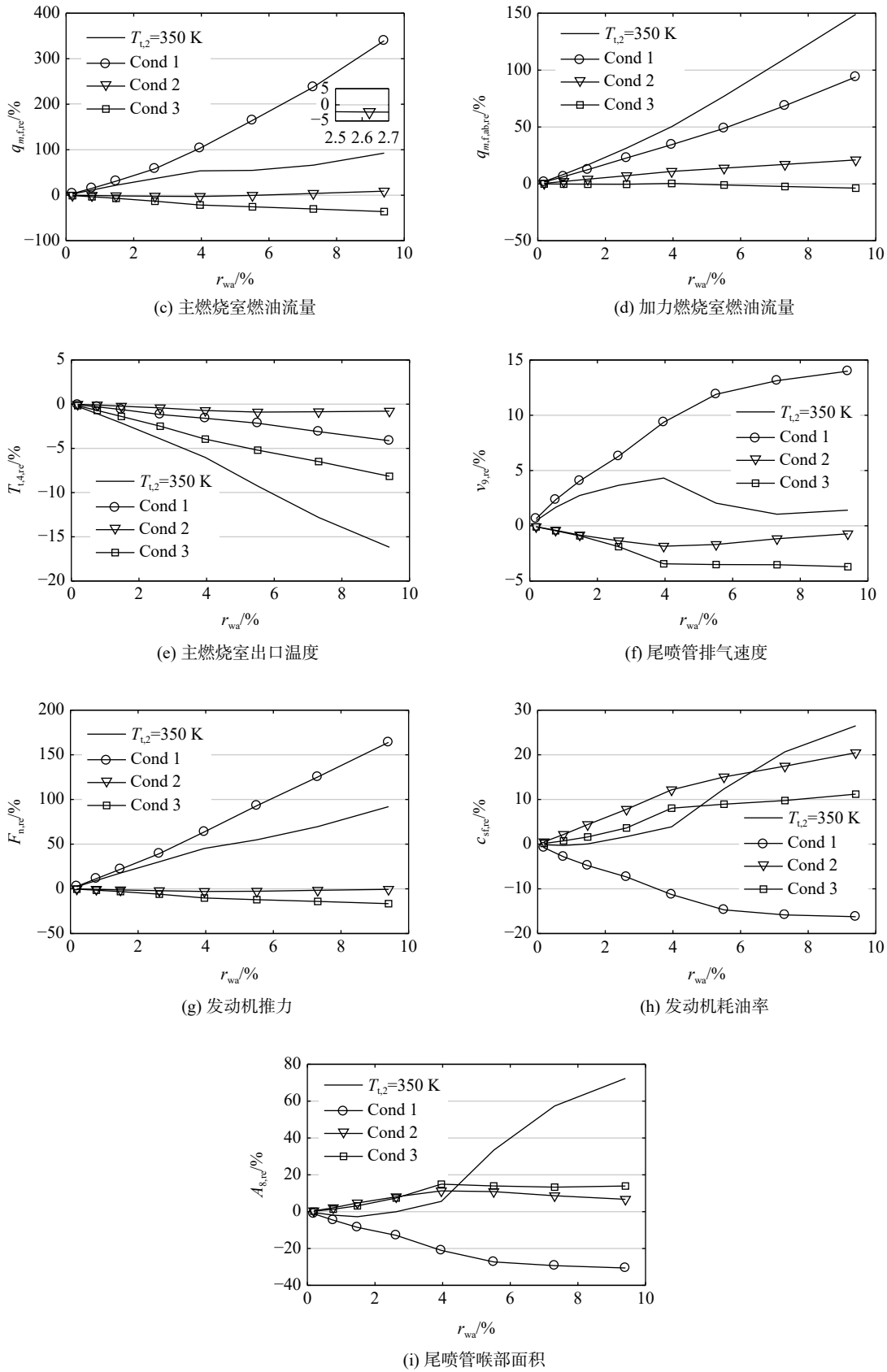


图 3 考虑 MIPCC 不同因素时发动机主要性能参数响应

Fig. 3 Response of engine main performance parameters considering different influencing factors of MIPCC

下降使得压缩部件耗功的增加凸显, $q_{m,f, re}$ 又逐渐增加。在涡轮部件的影响下, $r_{p,c, re}$ 与 $q_{m,f, re}$ 成相反的变化趋势, $r_{p,f, re}$ 则与 $q_{m,f, re}$ 成相同的变化趋势, 但由于低压转子做功受到高压转子的影响, 可以看到 $r_{p,f, re}$ 的变化比 $r_{p,c, re}$ 的变化更为明显, 且随着 r_{wa} 的增加, $r_{p,f, re}$ 的减小程度虽略有回升但始终比未预冷时小, 进而导致 $A_{8, re}$ 的增加和 $v_{9, re}$ 的降低。

$r_{p,f, re}$ 的减小也使得高压换算转速 $n_{cor, 2, re}$ 略微增加 (图 4(d))。同时由于风扇进气流量在转速恒定以及进气条件相同的情况下几乎不受工质热物理性质变化的影响, 使得发动机的推力略微减小。随着 r_{wa} 的增加, 保持同样的加力温度时, 含湿比定压热容的增加使得 $q_{m,f, ab, re}$ 迅速增加, 因而 $c_{sf, re}$ 也在迅速增加。

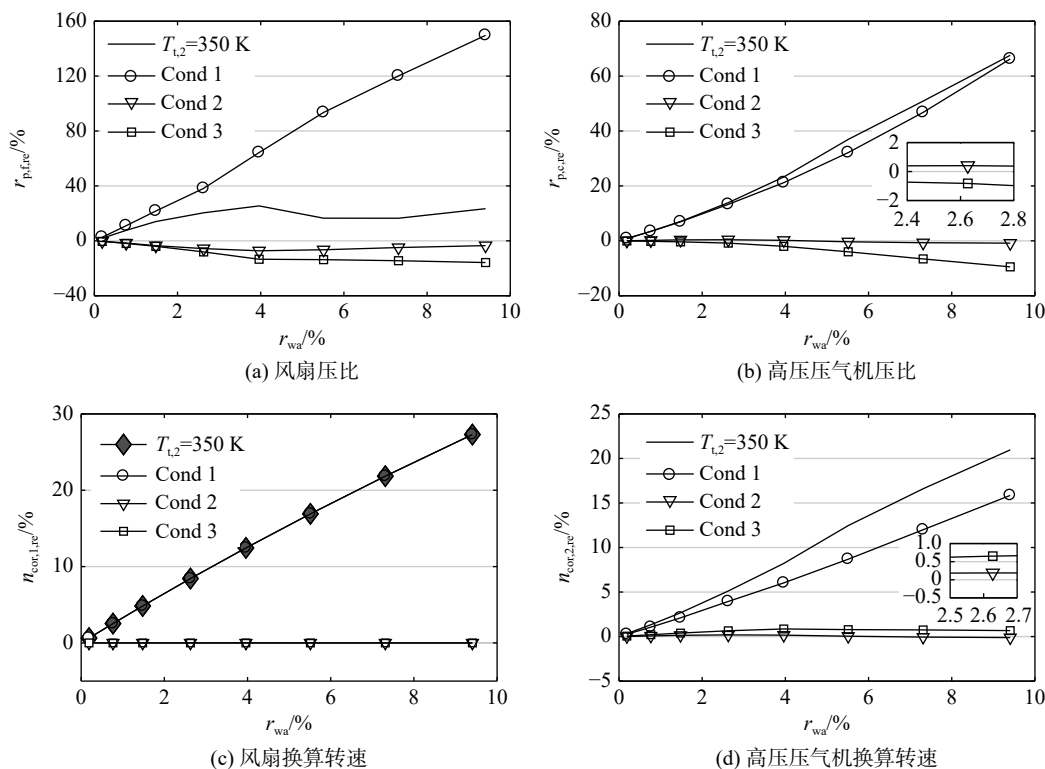


图 4 考虑 MIPCC 不同因素时压缩部件参数响应

Fig. 4 Response of compressor characteristics considering different influencing factors of MIPCC

3) 部件特性的变化对发动机的影响主要为含湿时工质的热物理性质改变引起的转子部件的轴向和周向马赫数的变化。随着 r_{wa} 的增加, 气体常数 R 增加的幅度大于比热比 γ 减小的幅度^[28], 喷水后转子换算流量特性的下降较换算转速特性的增加更为明显, 因此部件特性修正之后发动机的高低压转子流量 $q_{m, 1, re}$ 、 $q_{m, 2, re}$ 随着 r_{wa} 的增加其减小幅度也逐渐增加。保持高低压转速不变时, 主燃烧室供油量 $q_{m, f, re}$ 和加力燃烧室供油量 $q_{m, f, ab, re}$ 的减小幅度随之增加。由于含湿部件换算转速的修正随着 r_{wa} 的增加而增加, 在保持高低压转速不变时, 在进气总温不变或变化很小的情况下, 高低压换算转速也基本保持恒定, 因此 $r_{p, f, re}$ 、 $r_{p, c, re}$ 随着 r_{wa} 的增加而逐渐降低, $v_{9, re}$ 和 $F_{n, re}$ 也随之减少。受 $r_{p, f, re}$ 降低的影响, $n_{cor, 2, re}$ 则略微增加。相较供

油量的减少, 发动机推力的下降同时受到流量和排气速度减小的影响, 因此耗油率 $c_{sf, re}$ 增加。

通过比较 3 种因素, 可以看到, 在给定高低压物理转速的控制规律下, 进气道中发生的掺混换热是导致发动机流量和推力大幅增加的直接因素, 工质热物理性质和部件特性的修正则使得发动机的推力下降。在进气道不掺混换热或者小范围掺混换热以及不加力状态或者加力温度保持一定的情况下, 工质热物理性质的修正对核心机匹配的影响很小, 即使大范围温降下水气比已经接近 10%, 主燃烧室的温降仍在 2% 以内, 几乎可以忽略。加力状态时发动机耗油率的增加几乎全部来自于加力燃烧室中的工质比热的增加。而喷水后部件特性的变化产生的影响则随着喷水量的增加而增加, 且在进气道换热之后各部件的换算转速

增加,进而使得部件特性的影响加剧,大大减弱了进气温降对发动机工作带来的积极作用。

随着水气比的增加,即使部件特性修正带来的消极作用逐渐加剧,此时射流预冷仍在进气道掺混换热的影响下大范围的提高了发动机的推力水平,在规避了燃烧室过热的危险的同时也增加了压气机部件的工作能力。同时,由图3(i)可以看到,随着水气比的增加,尾喷管的喉部面积需要实现较大范围的机动调节才能充分发挥射流预冷下的积极作用。图5中同时给出了风扇以及高

压压气机喘振裕度随轨迹线的相对变化量,可以看到射流预冷之后,风扇的喘振裕度 $s_{m,f,rc}$ 和高压压气机的喘振裕度 $s_{m,c,rc}$ 均存在一定程度的降低,与文献[29]中的趋势基本一致。风扇由于处在进气道掺混换热的出口位置,掺混换热造成的工作点向喘振点的移动对风扇的影响更为明显,而随着水气比的增加,风扇性能的下降则重新使得其工作点远离喘振点。由图5可以看到,在保持进气总温为350 K时,喷水量处于6%~10%的高范围内,风扇和高压压气机工作的稳定性反而更好。

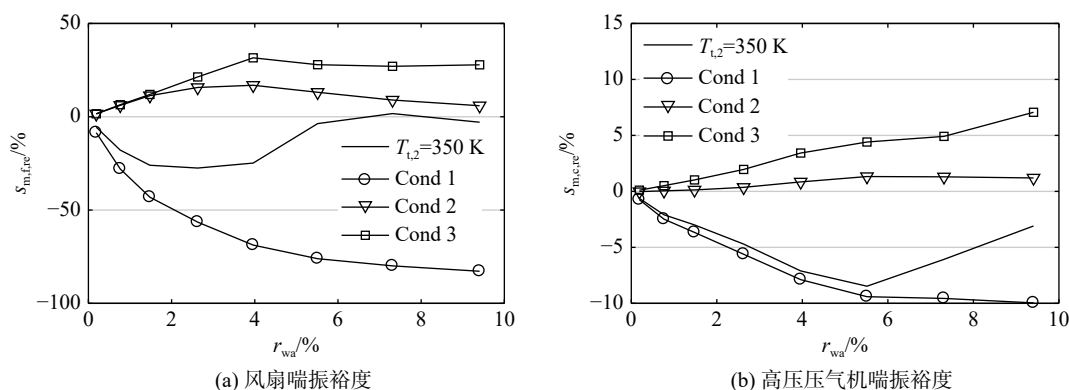


图5 考虑MIPCC不同因素时喘振裕度响应

Fig. 5 Response of surge margin considering different influencing factors of MIPCC

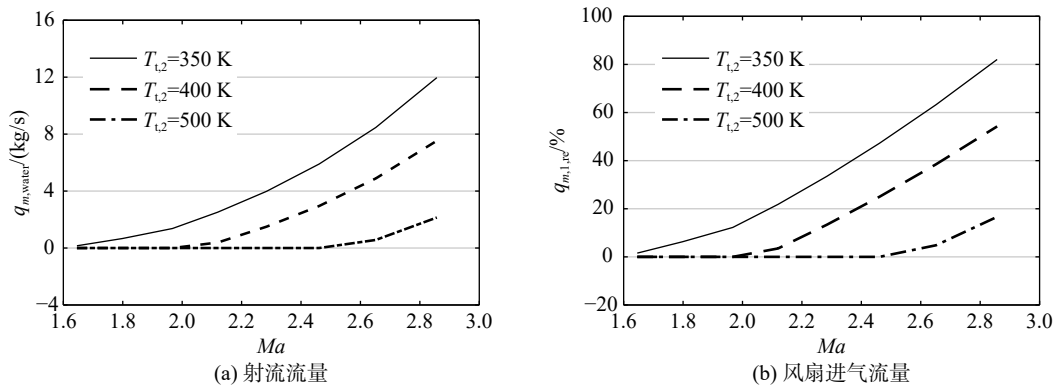
2.2 不同风扇进气总温下的发动机稳态性能仿真与分析

图6中给出了射流预冷保持风扇进气总温 T_{t2} 分别在350、400、500 K时的发动机性能参数对比,图标中下标 ap 表示表观值,下标 ac 表示实际值。

由图6可以看到,随着预冷温度的降低,开始射流的位置随着轨迹线向低马赫方向移动,且喷水量 $q_{m,water}$ 逐渐增加。风扇进气总温越低,受进气流量增加的影响,射流预冷对发动机推力的提高幅度就会越大(图6(c)),相应的耗油率和尾喷

管喉部的调节范围也越大(图6(d)~图6(e))。由图6(f)和图6(g)可知,随着预冷射流量的增加或者预冷温度的下降,即随着预冷深度的增加,相同飞行条件下发动机感受到的表观飞行高度 $H_{ap,rc}$ 以及马赫数 $Ma_{ap,rc}$ 相比实际的飞行高度 H_{ac} 和马赫数 Ma_{ac} 减少更多,发动机相当于工作在更低的高度和马赫数下,预冷深度的增加有效地扩展了发动机的工作包线。

图7中同时给出了不同预冷温度下风扇和压气机喘振裕度的相对变化趋势。可以看到,随着预冷温度的降低,风扇和压气机的稳定性虽然下



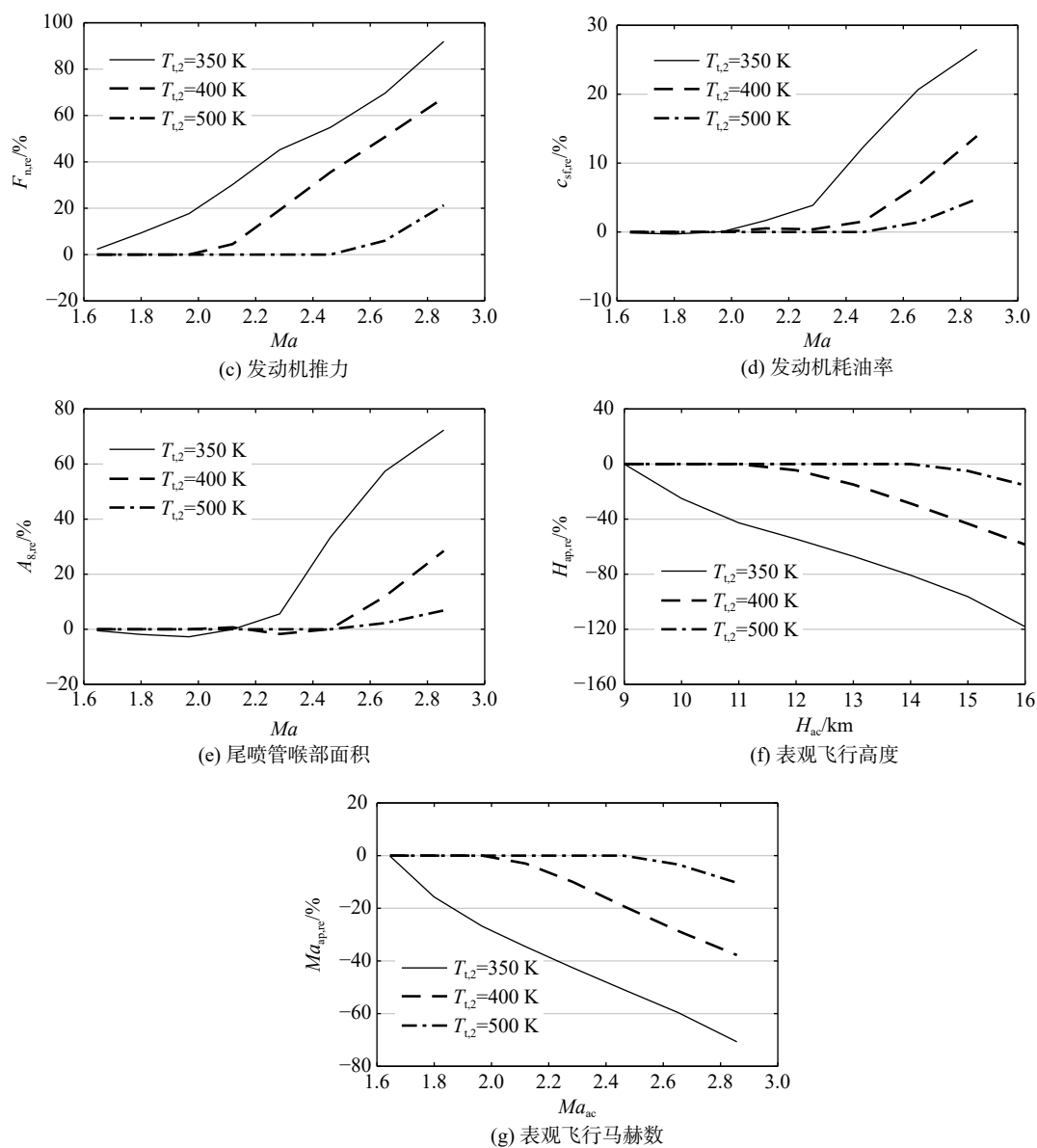


图 6 不同预冷温度下的发动机参数响应

Fig. 6 Response of engine parameters under different pre-cooling temperatures

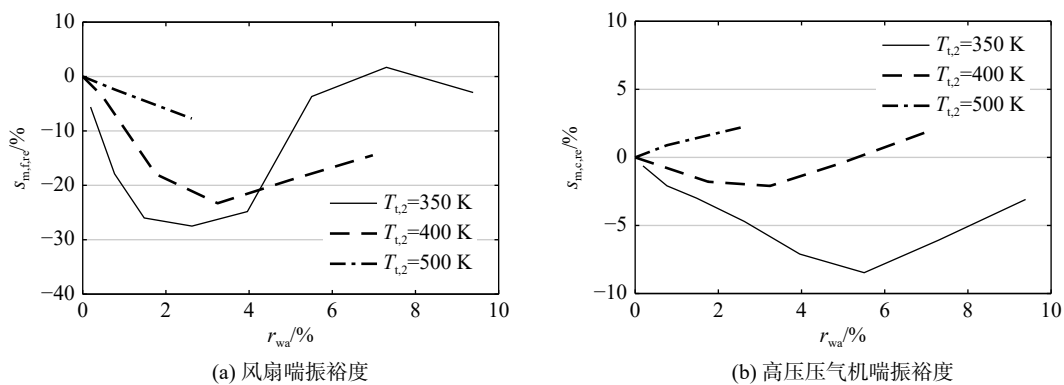


图 7 不同预冷温度下的喘振裕度响应

Fig. 7 Response of surge margin under different pre-cooling temperatures

降,但在不同的预冷温度下,随着水气比的增加,压缩部件的稳定性都会出现回升的趋势,可见即使在大范围的飞行包线扩展下需要较多的喷水量时,发动机的稳定性仍能得到保障,尤其是在高空高马赫的飞行轨迹点上水气比接近10%的范围内。然而在较低的飞行高度和马赫数下,进气道喷水则会对风扇和高压压气机的稳定性产生比较大的影响。此时可以通过进气道的不完全换热使风扇的进气总温不会降低太多来保证风扇的稳定性,但同时风扇换算转速的减小也会损失掉一部分进气道完全换热情况下发动机推力的增长。

3 结 论

本文通过分析射流预冷导致的进气道掺混换热、工质热物理性质变化以及部件特性变化三种影响因素模型,在保持高低压物理转速以及加力温度不变的控制规律下,将射流预冷的简化计算模型引入双轴涡扇发动机整机计算模型中,计算结果表明:

1) 射流预冷使得发动机的推力实现大幅增长。其中进气道中发生的掺混换热导致的进气流量的增加是引起推力增长的主要原因,工质热物理性质和部件特性的修正则对发动机的推力起着相反的作用。

2) 随着预冷深度的增加,射流预冷对发动机推力的积极作用逐渐增强。为了充分发挥射流预冷的积极作用,尾喷管的喉部面积应能实现较大范围的调节。预冷深度的增加能够有效地扩展发动机的工作包线,即发动机能够克服更为极端的飞行条件,但在较低的飞行高度和马赫数下,进气道喷水会对压缩部件的稳定性产生比较大的不利影响。

3) 通过将射流预冷的影响因素分别进行仿真分析,可有效地为射流预冷下发动机的性能参数表现以及为下一步射流预冷控制规律的制定提供理论基础。

为了简化计算,本文的射流预冷未考虑进气道内的喷水蒸发率问题。进气道出口气流的温降与喷水量以及液滴的蒸发率均有关,考虑蒸发率下的进气道温降以及液滴存在下工质热物理性质和部件特性的修正会略有不同,由此带来的部件的稳定性数值变化程度也会不同,但基本趋势是一致的。此外,由于研究中未与进气道进行联合仿真,所做工作中未涉及到进气道超临界工作

状态下的发动机性能分析。下一阶段工作应结合进气道特性,在进气道掺混换热计算中给定不同的蒸发率对发动机整机进行计算。

参考文献:

- [1] MESNARD J. An overview of the British Aerospace HOTOL transatmospheric vehicle[R]. NASA-TM-88008, 1986.
- [2] MEHTA U, BOWLES J, MELTON J, et al. Water injection pre-compressor cooling assist space access[J]. *The Aeronautical Journal*, 2015, 119(1212): 145-171.
- [3] BALEPIN V. Method and apparatus for reducing the temperature of air entering a compressor of a turbojet engine by variably injecting fluid into the incoming air: US6202404[P]. 2001-03-20.
- [4] 芮长胜, 张超, 越冬峰. 射流预冷涡轮发动机技术研究及发展[J]. *航空科学技术*, 2015, 26(10): 53-59.
RUI Changsheng, ZHANG Chao, YUE Dongfeng. Technical study and development of mass injecting pre-compressor cooling turbine engine[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2015, 26(10): 53-59. (in Chinese)
- [5] WHITE A J, MEACOCK A J. An evaluation of the effects of water injection on compressor performance[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2004, 126(4): 748-754.
- [6] MULIK P R, SINGH P P, COHN A. Effect of water injection for NOx reduction with synthetic liquid fuels containing high fuel-bound nitrogen in a gas turbine combustor[R]. Houston, US: ASME International Gas Turbine Conference and Products Show, 1981.
- [7] HALL E W, WILCOX E. Theoretical comparison of several methods of thrust augmentation for turbojet engines[R]. NACA Rep. 992, 1948.
- [8] LUNDIN B T. Theoretical analysis of various thrust-augmentation cycles for turbojet engines[R]. NACA Rep. 981, 1950.
- [9] WILCOX E, TROUT A M. Analysis of thrust augmentation of turbojet engines by water injection at compressor inlet including charts for calculating compression processes with water injection[R]. NACA-TR-1006, 1951.
- [10] HILL P G. Aerodynamic and thermodynamic effects of coolant injection on axial compressors[J]. *Aeronautical Quarterly*, 1963, 14(4): 331-348.
- [11] SANAYE S, REZAZADEH H, AGHAZEYNALI M, et al. Effects of inlet fogging and wet compression on gas turbine performance[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Barcelona, Spain: ASME, 2006: 769-776.
- [12] MEACOCK A J, WHITE A J. The effect of water injection on multi-spool gas turbine behaviour[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128(1): 273-280.
- [13] NOVELO D A B, IGIE U. Aero engine compressor cooling by water injection: Part 1 evaporative compressor model[J]. *Energy*, 2018, 160: 1224-1235.
- [14] NOVELO D A B, IGIE U. Aero engine compressor cooling by water injection: Part 2 performance and emission reductions[J]. *Energy*, 2018, 160: 1236-1243.
- [15] MILLER J. Peace Jack an enigma exposed[J]. *Air International*, 1985, 7: 18-23.
- [16] CARTER P, BALEPIN V. Mass injection and precompressor cooling engines analyses[R]. AIAA2002-4127, 2002.
- [17] 商旭升, 蔡元虎, 肖洪, 等. 射流预冷却涡轮基发动机的技术研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2004, 24(增刊4): 335-337, 341.

- SHANG Xusheng, CAI Yuanhu, XIAO Hong, et al. Research on techniques of mass injection and precooling engines[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2004, 24(Suppl.4): 335-337, 341. (in Chinese)
- [18] 王占学, 乔渭阳. 预冷却涡轮基组合循环发动机发展现状及应用前景[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2005, 18(1): 53-56, 62.
- WANG Zhanxue, QIAO Weiyang. An overview of development study and key technology of pre-cooled turbine based combined cycle engine[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2005, 18(1): 53-56, 62. (in Chinese)
- [19] 商旭升, 蔡元虎, 陈玉春, 等. 高速飞行器用射流预冷却涡轮基发动机性能模拟[J]. *中国空间科学技术*, 2005, 25(4): 54-58.
- SHANG Xusheng, CAI Yuanhu, CHEN Yuchun, et al. Performance simulation of the mass injection pre-cooled TBCC engine for hypersonic vehicles[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2005, 25(4): 54-58. (in Chinese)
- [20] 李成, 蔡元虎, 屠秋野, 等. 射流预冷却吸气式涡轮火箭发动机性能模拟[J]. *推进技术*, 2011, 32(1): 1-4, 31.
- LI Cheng, CAI Yuanhu, TU Qiuye, et al. Performance simulation of air-turbo-rocket with water injection pre-cooler[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(1): 1-4, 31. (in Chinese)
- [21] 刘月玲, 张超. 射流预冷试验温度和湿度测试研究[R]. 北京: 航空试验测试技术学术交流会, 2015.
- [22] 刘旭峰, 常鸿雯, 薛洪科, 等. 射流预冷装置温降与流阻特性试验研究[J]. *航空发动机*, 2018, 44(2): 81-86.
- LIU Xufeng, CHANG Hongwen, XUE Hongke, et al. Investigation on temperature drop and flow resistance characteristics of mass injection pre-compressor cooling device[J]. *Aeroengine*, 2018, 44(2): 81-86. (in Chinese)
- [23] 罗佳茂, 乐嘉陵, 杨顺华, 等. TBCC发动机涡轮进气道喷水冷却特性数值研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(6): 1210-1219.
- LUO Jiamao, LE Jialing, YANG Shunhua, et al. Numerical study on pre-cooling characteristics with water injection for TBCC turbine inlet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(6): 1210-1219. (in Chinese)
- [24] 安利平, 王昊, 朱自环, 等. 高速来流发动机射流预冷及压气机湿压缩特性一体化分析方法[J]. *推进技术*, 2021, 42(3): 560-568.
- AN Liping, WANG Hao, ZHU Zihuan, et al. Integrated analysis approach of injection precooling and compressor wet compression characteristics of jet-engine under high speed inflow condition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(3): 560-568. (in Chinese)
- [25] 骆广琦. 航空燃气涡轮发动机数值仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [26] WAGNER W, COOPER J R, DITTMANN A, et al. The IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, 122(1): 150-184.
- [27] TAN Tian, CHEN Yuchun, LI Haomin, et al. Research on control law of high speed turbofan engine[C]//Proceedings of IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. Piscataway, US: IEEE, 2019: 171-176.
- [28] 赵运生, 顾卫群, 阙建锋, 等. 环境湿度对民用涡扇发动机性能影响研究[J]. *航空工程进展*, 2017, 8(3): 315-320.
- ZHAO Yunsheng, GU Weiqun, QUE Jianfeng, et al. Research on the ambient humidity effect on civil turbofan engine performance[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2017, 8(3): 315-320. (in Chinese)
- [29] ROUMELIOTIS I, ARETAKIS N, MATHIOUDAKIS K. Performance analysis of twin-spool water injected gas turbines using adaptive modelin [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. Volume 1: Turbo Expo 2003. Atlanta, Georgia, USA: ASMEDC, 2003: 861-870[2023-07-28].

(编辑: 王碧珺)