

三外涵变循环发动机性能数值模拟

刘 勤¹, 周人治¹, 王占学², 黄红超¹

(1. 中国燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 与双外涵模式相比,三外涵变循环技术将使发动机工作范围更广,更易满足未来发动机的自适应要求,及更大提升飞机综合性能。在带核心机驱动风扇级(CDFS)双外涵变循环发动机性能仿真方法基础上,构建了前调节阀门、后调节阀门、第三外涵等的数学模型,开展了三外涵变循环发动机性能模拟方法研究,重点分析了三外涵变循环发动机的稳态性能。结果表明:相比单外涵和双外涵模式,三外涵模式总涵道比调节程度更大,发动机最大状态与亚声速巡航状态间的燃油经济性更明显。

关键字: 航空发动机;三外涵;变循环;核心机驱动风扇级;数值模拟;性能特性

中图分类号: V231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2014) 05-0001-04

Numerical Simulation on Performance of Triple Bypass Variable Cycle Engine

LIU Qin¹, ZHOU Ren-zhi¹, WANG Zhan-xue², HUANG Hong-chao¹

(1. China Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China; 2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Compared with double bypass mode, triple bypass VCE (variable cycle engine), with broader operation range brought by triple bypass mode, can satisfy adaptive request of future engine more easily and improve the performance of aeroplane. Based on performance simulation method of a double bypass VCE with core driven fan stage (CDFS), a triple bypass VCE counterpart was developed with introduction of some components including front adjustor valve, rear adjustor valve and the third bypass duct as well as performance simulation method. Steady performance of the triple bypass VCE was particularly simulated and analyzed. The results show that in contrast to single and double bypass mode, the triple bypass mode can increase the extent of adjusting for the total bypass ratio and improve the fuel economy between maximum power and subsonic cruise power in evidence.

Key words: aero-engine; triple bypass; variable cycle; core driven fan stage; numerical simulation; performance characteristics

1 引言

变循环发动机是未来新一代战斗机的理想动力装置,其技术研究得到了国外发达国家的高度重视。变循环概念起源于上世纪60年代中期,各国提出了多种结构方案^[1],但这些方案由于自身的不同缺陷,其研究都没能继续开展。直至1974年,美国通用电气公司(GE)提出了双外涵的概念^[2],才正式确认

了近代变循环发动机的形式及典型特征。而在此基础上发展的F120变循环发动机,也成为了第四代战斗机F-22的候选动力。进入21世纪以来,美国在F120发动机的基础上开始了新一代变循环发动机技术研究,如革命性涡轮加速器(RTA)、自适应通用发动机技术(ADVANT)研究等^[3]。2012年,美国空军和国防部启动了ADVANT计划的后续项目——自

适应发动机技术发展计划(AETD),重点研究三外涵技术满足未来发动机的自适应技术要求^[4]。与双外涵变循环发动机相比,三外涵模式更易改善发动机的经济性。三外涵变循环发动机的工作范围更广,能进一步增大涵道比,降低耗油率;此外,第三外涵的存在,可用于提取更多的功率和实现更好的热管理,也可提高发动机流通能力以降低溢流阻力等^[5]。

本文在带核心机驱动风扇级(CDFS)双外涵变循环发动机性能仿真方法基础上,通过构建前调节阀门、后调节阀门、第三外涵等数学模型,开展了三外涵变循环发动机性能方法研究,重点计算分析了三外涵变循环发动机的稳态性能。

2 三外涵变循环发动机工作机理

三外涵变循环发动机,是在双外涵变循环发动机的核心机和低压压缩系统的基础上^[6-7],增加了可开合的第三外涵,每个风扇都有自己的外涵道以控制气流,如图1所示。前风扇外涵出口的前调节阀门,可调节后风扇和第三外涵空气流量以控制发动机涵道比,同时也能提高发动机流通能力以降低溢流阻力。后风扇外涵出口的中调节阀门,可调节CDFS和前涵道空气流量以控制发动机涵道比。喷管进口处的后调节阀门,可调节第三外涵气流与加力燃烧室出口气流掺混时的静压平衡。前风扇与后风扇连在一起,由低压涡轮驱动;CDFS与压气机连在一起,由高压涡轮驱动。该布局可平衡高、低压涡轮之间的功载荷,高压涡轮转子也可做更多的功。

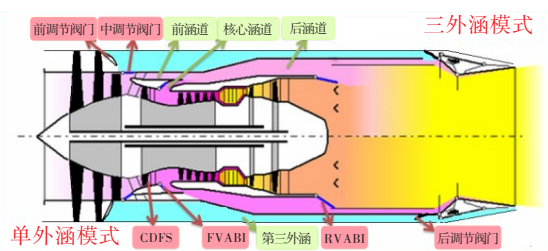


图1 三外涵变循环发动机工作机理

Fig.1 Working principle of triple bypass variable cycle engine

三外涵变循环发动机在加速、超声速飞行的高功率状态下,以单外涵模式工作。此时,前、后调节阀门关闭,中调节阀门因阀门前后压差所关闭,前风扇出口的所有气体都流入CDFS,前变面积涵道引射器(FVABI)/后变面积涵道引射器(RVABI)均处于关小状态,使发动机处于小涵道比涡扇发动机工作状

态。CDFS后气流仅小部分流入核心涵道,绝大部分流入核心机,以提高发动机单位推力。

三外涵变循环发动机在起飞、爬升的中等功率状态下,以双外涵模式工作。此时,前、后调节阀门关闭,中调节阀门因阀门前后压差所打开,FVABI/RVABI均处于开大状态,使发动机处于中等涵道比涡扇发动机工作状态。在保证推力需求的前提下,增大发动机涵道比以降低耗油率。

三外涵变循环发动机在亚声速巡航的低功率状态下,以三外涵模式工作。此时,前、后调节阀门打开,中调节阀门因阀门前后压差所打开,FVABI/RVABI均处于开大状态,使发动机处于大涵道比涡扇发动机工作状态。在保证推力需求的前提下,进一步增大发动机涵道比以降低耗油率。

3 三外涵变循环发动机性能模拟方法

在双外涵变循环发动机性能仿真方法基础上^[8],建立三外涵变循环发动机性能模拟方法,并开发相应计算软件。

针对图1的高压涡轮驱动核心风扇级的双轴混合排气结构型式,三外涵发动机的共同工作条件,在常规双轴涡扇和双外涵变循环发动机基础上增加为11个:前风扇内涵与后风扇流量平衡,后风扇内涵与CDFS流量平衡,CDFS内涵与压气机流量平衡,高压涡轮与燃烧室流量平衡,低压涡轮与高压涡轮流量平衡,尾喷管与加力燃烧室流量平衡,低压涡轮与前风扇和后风扇功率平衡,高压涡轮与CDFS和压气机功率平衡,前混合室外涵静压平衡,中混合室外涵静压平衡和后混合室外涵静压平衡。

采用零维、稳态的计算方法计算三外涵变循环发动机性能。其基本思路是从发动机进气道截面至尾喷管出口截面进行热力计算,遇到未知量时就假定一个初值,最后根据平衡技术求解其精确值。依据已知工作条件和假定未知量,可计算出发动机各个部件进出口截面的气动参数,此后通过发动机共同工作方程来验证这11个假定未知量的正确性,其计算流程如图2所示。

4 三外涵变循环发动机性能计算分析

基于国外四代机设计水平^[9]和变循环发动机技术特征^[10],选取三外涵变循环发动机设计点循环参数和非设计点计算时所需的部件特性。主要设计点

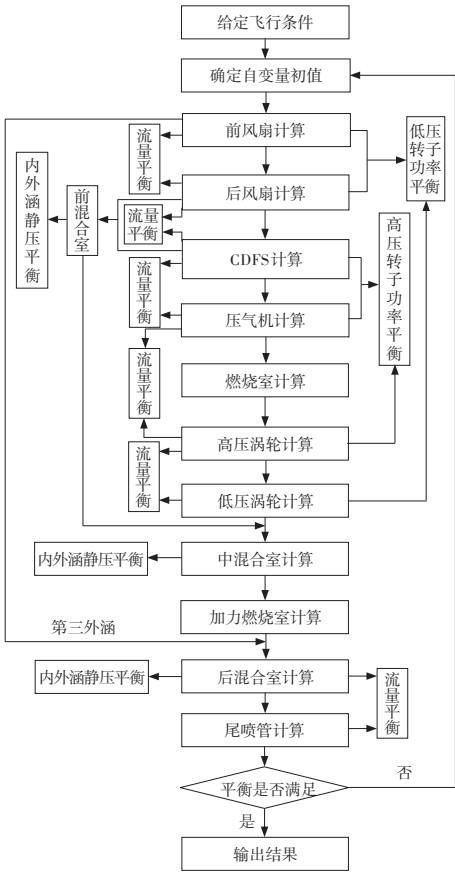


图2 三外涵变循环发动机性能计算流程

循环参数见表1。

表1 三外涵变循环发动机设计点参数
Table 1 Design parameters of triple bypass variable cycle engine

参数	数值
高度/km	0
马赫数	0
发动机进口空气流量/(kg/s)	130
总增压比	26
总涵道比	0.85
涡轮前燃气总温/K	1 900

高度-速度特性计算时,控制规律采用高压转子相对物理转速和喷管喉部面积为常数,通过打开或关闭发动机前风扇、后风扇的调节阀和CDFFS外涵出口FVABI来实现模式转换,计算结果见图3。

分析图3(a)~图3(c)可知:发动机在三外涵工作模式下,受飞行条件影响的主要是前、后风扇涵道比,而CDFFS涵道比影响较小;前风扇涵道比与CDFFS涵道比变化趋势一致,与后风扇涵道比变化趋势相反。因此,三外涵模式下应特别注重前风扇和后风扇的参数匹配。

分析图3(d)可知:相比较而言,三外涵模式发动机总涵道比随高度、马赫数的调节程度更大,单外涵

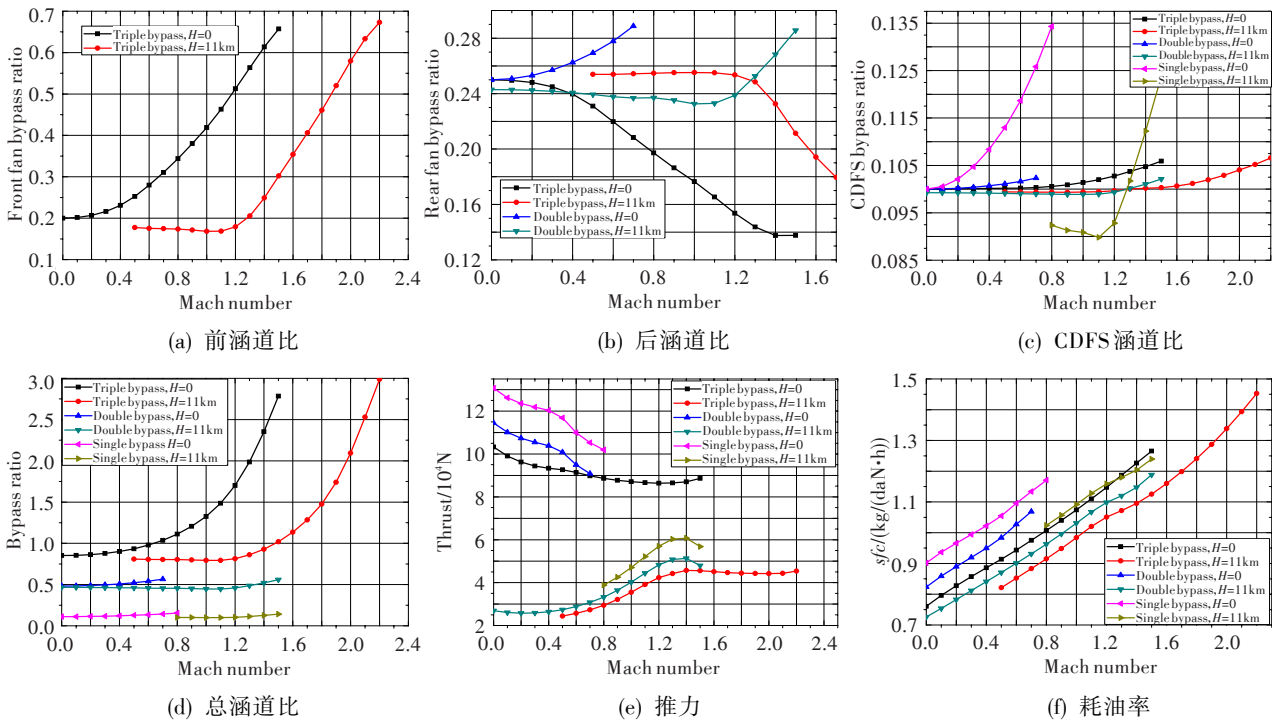


图3 高度-速度特性

Fig.3 Altitude-velocity characteristics

和双外涵模式下其总涵道比随高度、马赫数的调节程度较小或基本保持不变。因此,三外涵模式能有效调节发动机总涵道比,更易满足发动机对涵道比的需求。

分析图3(e)和图3(f)可知:与单外涵和双外涵模式相比,三外涵模式发动机推力和耗油率低,主要是因为总涵道比更大。由此可见,大推力时,变循环发动机应采用单外涵工作模式以增大推力;中等推力时,应采用双外涵工作模式以降低发动机耗油率;小推力时,采用三外涵的工作模式以进一步降低发动机耗油率。

节流特性计算时,控制规律采用喷管喉部面积为常数和低压转子相对物理转速可变的方式,通过打开或关闭发动机前风扇、后风扇调节阀和CDFS外涵出口FVABI来实现模式转换,计算结果见图4。

分析图4(a)~图4(c)可知:发动机在三外涵工作模式下,受飞行条件影响的主要是前、后风扇涵道比,前风扇涵道比调节程度较后风扇大,CDFS涵道比基本保持不变;后风扇涵道比在低马赫数下基本保持不变,马赫数大于0.8,其变化趋势与前风扇相反。因此,三外涵模式下要特别注意临界马赫数时的前后风扇匹配问题。

分析图4(d)可知:相比单外涵和双外涵模式,三外涵模式发动机总涵道比随低压转子转速的调节目

度更大。因此,三外涵模式下,低压转子转速能有效调节发动机总涵道比。

分析图4(e)和图4(f)可知:与单外涵和双外涵模式相比,三外涵工作模式下,随着低压转子转速的减小,三外涵变循环发动机总涵道比呈增大趋势,有助于降低发动机耗油率;随着飞行马赫数的增大,三外涵变循环发动机的推力、耗油率都不断增大。

5 结论

本文开展了三外涵变循环发动机稳态性能数值模拟研究,掌握了三外涵变循环发动机工作机理,建立的性能计算模型、开发的数值仿真软件,具有模拟不同模态变循环发动机性能的功能。相比单、双外涵模式,三外涵模式调节变量多,能进一步增大发动机涵道比,降低发动机耗油率,很好地改善发动机最大状态与亚声速巡航状态之间的经济性。

对三外涵变循环发动机性能数值模拟结果分析表明:在加速、超声速飞行等需要最大推力时,三外涵变循环发动机应当关闭前风扇和后风扇外涵,采用单外涵模式以提高发动机推力;在起飞等需要中等推力时,三外涵变循环发动机应当关闭前风扇外涵,即关闭第三外涵,打开后风扇和CDFS外涵,采用双外涵模式以降低耗油率;在亚声速巡航等不需

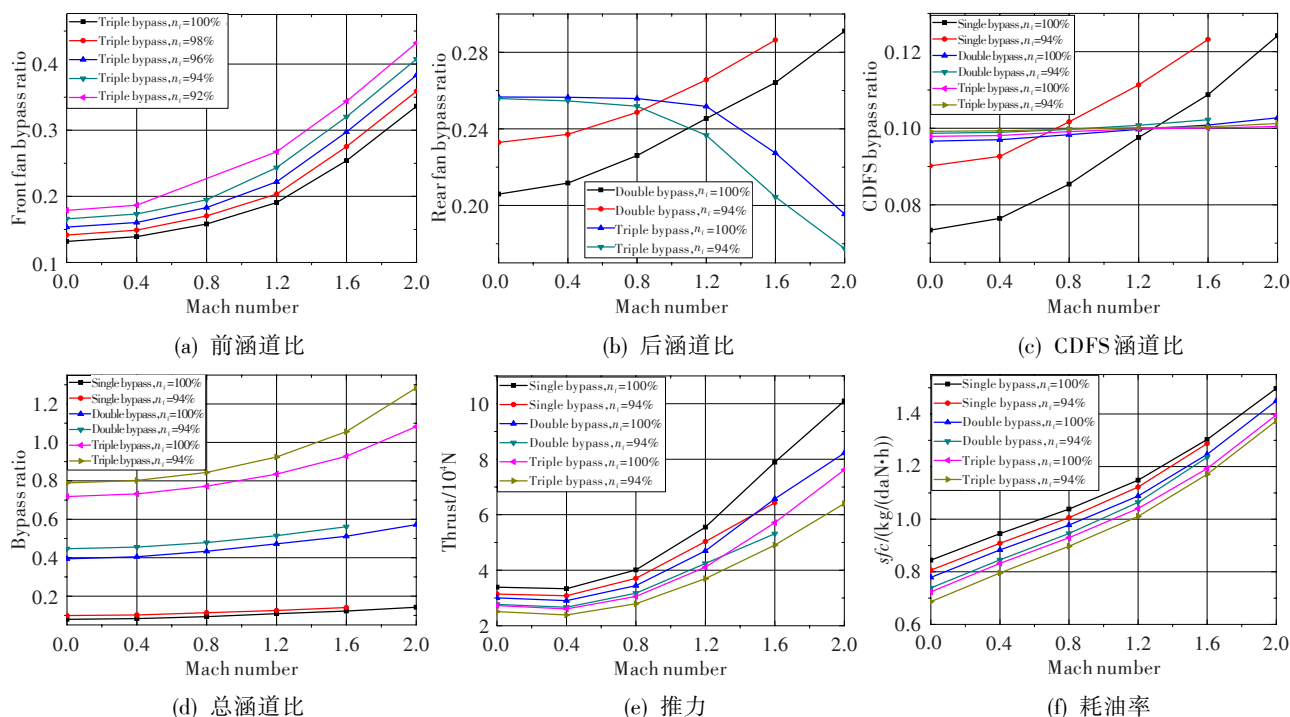


图4 节流特性

Fig.4 Throttling Characteristics

(下转第11页)