

基于 3 维数值仿真的变循环压缩系统部件匹配分析

李晓庆, 孟德君, 尹松

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 为了研究变循环压缩系统中各部件之间的匹配关系以及在整机调节时的表现, 采用 3 维数值仿真软件对变循环发动机的风扇、核心机驱动风扇级(CDFS)、高压压气机和外涵道开展联合数值仿真, 并对数值计算与试验结果的差异。针对单、双涵工作模式, 开展内、外涵出口节流特性计算, 分析了内、外涵出口压力调节导致的各部件匹配关系的变化, 获得了涵道比的变化范围以及极限调节状态下的各部件表现出的流动特征, 确定了制约整个压缩系统喘振裕度的关键部件。结果表明: 在双涵模式下, 外涵节流导致风扇匹配点明显提高, 首先到达喘振边界; 在单涵模式下, 外涵节流导致风扇和 CDFS 匹配点同时提高, 几乎同时到达喘振边界; 在单、双涵模式下, 内涵节流均使高压压气机首先到达喘振边界。仿真得到的外涵道损失与试验偏差在 4% 以内。

关键词: 变循环; 风扇; 高压压气机; 节流特性; 涵道比; 匹配性能; 数值模拟; 航空发动机

中图分类号: V211.6

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.03.005

Component Matching Analysis of Variable Cycle Compression System Based on 3D Numerical Simulation

LI Xiao-qing, MENG De-jun, YIN Song

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to study the component matching of a variable cycle compression system and its performance during whole engine operation and adjustment, joint simulation of the fan, CDFS, compressor, and bypass duct of a variable cycle engine was carried out by using 3D numerical tools. The differences between numerical calculation and experimental results were compared. The core-flow throttling characteristics and bypass-flow throttling characteristics were investigated for the single and double bypass mode. The changes in component matching relationships caused by core and bypass outlet pressure regulation were analyzed. The variation range of the bypass ratio and flow characteristics of each component under limit regulation conditions were derived. The key components that constrain the surge margin of the whole compression system were identified. The results show that in double bypass mode, bypass throttling leads to a significant increase in the fan operating point, causing the fan to first reach the surge boundary; while under single bypass mode, bypass throttling leads to a simultaneous increase to the operating points of the fan and the CDFS, causing them to reach the surge boundary almost simultaneously. Core flow throttling causes the high-pressure compressor to first reach the surge boundary in both single and double bypass mode. The deviation between the numerically derived bypass loss and the experimental result is within 4%.

Key words: variable cycle; fan; high pressure compressor; throttling characteristics; bypass ratio; performance matching; numerical simulation; aeroengine

0 引言

变循环发动机可以在不同的工作状态下采用不同的工作模式, 通过部件几何和热力参数的调节, 兼顾超声速巡航的高推力性能和亚声速飞行的低耗油率要求^[1-3]。面对未来先进战斗机的多任务作战需求, 变循环发动机逐渐显现出其优越性, 成为各国致力研究的动力装置之一^[4-6]。变循环发动机的压缩系统新

增了模式选择阀门、前涵道引射器等特征部件, 具有全新的气动布局形式。与常规循环发动机相比, 变循环压缩系统构成了新的匹配关系, 具有更强的耦合性。

国内外学者对变循环发动机压缩系统开展了广泛研究。GE公司在变循环发动机研制方面一直处于领先地位, 自 20 世纪 60 年代至今, GE公司已先后经历了 5 代变循环发动机的研制^[7], 具有雄厚的技术储

收稿日期: 2022-11-15 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 李晓庆(1985), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 李晓庆, 孟德君, 尹松. 基于 3 维数值仿真的变循环压缩系统部件匹配分析[J]. 航空发动机, 2024, 50(3): 40-46. LI Xiaoqing, MENG Dejun, YIN Song. Component matching analysis of variable cycle compression system based on 3D numerical simulation[J]. Aeroengine, 2024, 50(3): 40-46.

备^[7-8]。张鑫等^[9-11]分析了核心机驱动风扇级的气动设计特点和难点,以及气动布局、预旋分布和转子径向负荷分布对核心机驱动风扇级(Core Driven Fan Stage, CDFS)性能的影响;刘宝杰等^[12-14]编写了基于流线曲率法的一体化通流设计程序,并研究了前涵道引射器在通流计算中的模拟方法,对CDFS与高压压气机在设计转速下内、外涵单独节流进行了数值模拟,论证了外涵单独节流可以实现涵道比大范围调节的能力;马昌友等^[15-16]建立了CDFS与高压压气机匹配状态点关联预估简化方程,发展了匹配性能预估程序,进行了典型匹配涵道比分析和涵道比调节对匹配性能影响研究,并开展了CDFS与高压压气机匹配试验平台搭建及试验研究。上述研究大多针对CDFS、前涵道引射器等单个部件,以及CDFS、高压压气机和前涵道组成的核心压气机开展的,重点关注了各变循环特征部件的设计特点,以及CDFS与压气机的匹配关系,而对于高、低压压缩部件与外涵道构成的联合压缩系统的研究,以及变循环压缩部件在整机环境中的匹配研究相对较少。随着变循环发动机及其压缩部件设计技术的日渐成熟和研究的逐渐深入,对于高、低压压缩部件与外涵道构成的联合压缩系统的研究需求增加,更加关注压缩系统内各部件间匹配关系,以及在压缩系统调节过程中容易产生首发失稳的部件。

本文采用NUMECA3维数值仿真软件,开展了变循环高、低压压缩部件与外涵道联合数值仿真。

1 研究对象与数值计算方法

本文的变循环压缩系统如图1所示,包含风扇、中介机匣、CDFS、前涵道引射器、高压压气机和外涵道。涵道分为第1外涵道(前涵道)、第2外涵道和外涵道。

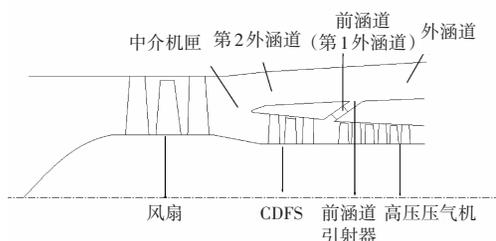


图1 变循环压缩系统

采用NUMECA对变循环发动机联合压缩系统在单、双涵模式下开展了全3维数值模拟。采用前处理

模块AutoGrid分别生成风扇、中介机匣、CDFS和高压压气机的单通道计算网格;采用前处理模块划分外涵道计算网格,然后将各部分网格导入IGG进行对接并设置交界面。计算域内网格总数约为650万。其中,风扇网格数约为270万,中介机匣网格数约为30万,CDFS与前涵道、高压压气机组成的核心压缩系统网格数约为340万,外涵道网格数约为10万。叶片采用O型网格拓扑结构。

联合压缩系统在单、双涵模式下的计算网格如图2所示。2种模式下计算模型的主要差异在于中介机匣及外涵道的网格和边界条件设置。在双涵模式下,中介机匣为2个涵道,中介机匣和外涵进口网格面设置为ROT边界;在单涵模式下,模式选择阀关闭,中介机匣只有内涵1个出口,外涵进口网格面设置为SOL边界。为了便于网格划分并提高计算收敛性,对中介机匣和外涵道几何模型进行简化,去掉了凸台等局部细节结构。该简化可能会造成外涵仿真结果偏乐观,但由于外涵气流速度较低,凸台处所形成低速涡流区带来的损失相对较小,因此认为该简化带来的误差不影响后续的分析 and 结论。



图2 计算网格

计算域有1个进口、2个出口,进口给定轴向均匀进气,内、外涵出口分别根据计算工况给定平均静压。采用定常计算、S-A模型和中心差分格式。由于该计算域内包含多个部件,且进、出口热力学参数梯度大,因此,采用均匀初场通常不容易收敛,需要先分别计算各部件初场,然后在整个计算域联算时进行分别调用。

2 联合仿真与整机试验的对比

2.1 双涵模式下的仿真计算

针对双涵试验工况,开展双涵模式下的联合仿真计算(图2(a))。在计算时,根据试验调节规律给定各排可调叶片角度和前涵道开度。由于所研究的压缩系统包含多个部件,每个部件的匹配工况除了与给定的计算域进、出口边界条件有关,还与其他部件的匹配工况相关。此外,由于计算精度带入的误差,很难通过调节计算域出口背压使压缩系统中的各部件均

达到预期的试验压比。因此,通过调节内、外涵出口背压使风扇、CDFS、高压压气机压比均尽量接近整机试验的匹配压比,偏差在2%以内。在双涵模式下,数值计算值与试验值对比见表1。

表1 在双涵模式下数值计算值与试验值对比 %

参数	计算值与试验值的偏差	参数	计算值与试验值的偏差
风扇相对物理转速	0	CDFS内涵/压气机换算流量	4.1
风扇相对换算转速	0	CDFS外涵/第1外涵换算流量	-14.9
风扇换算流量	-0.4	CDFS压比	-0.3
风扇压比	1.1	压气机相对换算转速	-0.4
CDFS相对物理转速	0	压气机压比	0.5
CDFS相对换算转速	-0.2	外涵总恢复系数	3.4
CDFS换算流量	1.3		

从表中可见,在双涵模式下,各部件压比与试验工况基本相当,但流量存在一定的偏差。其中,计算比试验的高压压气机流量偏高,第1、2外涵流量偏低,说明高压压气机的实际通流能力比计算弱,造成较多的流量流入外涵道。外涵总压恢复系数为第1、2外涵进口至计算域出口的损失,计算的总压恢复系数比试验高3.4%。在双涵状态下计算外涵总的气动损失时采用折合总压恢复系数计算

$$\text{折合总压恢复系数} = \frac{P_{out}^* \cdot (m_1 + m_2)}{P_1^* \cdot m_1 + P_2^* \cdot m_2} \quad (1)$$

式中: P_{out}^* 为外涵出口总压; P_1^* 为第1外涵进口总压; P_2^* 为第2外涵进口总压; m_1 为第1外涵进口流量; m_2 为第2外涵进口流量。

2.2 在单涵模式下的仿真计算

采用图2(b)中的网格,开展在单涵模式下的联合仿真计算。根据试验调节规律给定各排可调叶片角度和前涵道开度。通过调节内、外涵出口压力,使风扇、CDFS、高压压气机压比均接近整机试验的匹配压比,计算得到单涵模式下数值计算与试验参数对比,见表2。

从表中可见,在单涵模式下计算得到的各部件匹配关系与双涵模式相似。在各部件计算压比与试验相当的情况下,高压压气机流量偏高、第1外涵流量偏低。不同的是,在单涵模式下计算得到的外涵总压恢复系数比试验值低3.9%。

表2 单涵模式下数值计算值与试验值对比 %

参数	计算值与试验值的偏差	参数	计算值与试验值的偏差
风扇相对物理转速	0	CDFS内涵/压气机换算流量	5.2
风扇相对换算转速	0	第1外涵换算流量	-19.6
风扇换算流量	3.0	CDFS压比	-0.1
风扇压比	-0.4	压气机相对换算转速	-0.2
CDFS相对物理转速	0	压气机压比	1.5
CDFS相对换算转速	-0.4	外涵总恢复系数	-3.9
CDFS换算流量	0.3		

3 单、双涵模式下的节流特性分析

为进一步分析内、外涵出口压力调节对压缩系统内各部件工作状态的影响,以及引起的各部件匹配关系和涵道比的变化,对变循环高、低压联合压缩系统在单、双涵工作模式(图2)下,分别开展内、外涵出口节流特性计算。需要指出的是,在高、低压联合压缩系统中,风扇由低压轴驱动,CDFS和高压压气机由高压轴驱动,因此通过联合仿真计算压缩系统内、外涵节流特性时,实际上忽略了整机环境中内、外涵出口压力变化和各部件工况变化带来的整机匹配的变化,以及高、低压轴转速的变化。因此,假设高、低压轴转速不变,开展3维黏性情况下压缩系统各个部件之间的匹配分析。后续将本文的研究结果与整机匹配关联,可进一步开展变循环发动机整机匹配研究。

3.1 双涵模式下的外涵节流特性

开展双涵模式下的外涵节流特性计算。外涵节流是指内涵道出口压力保持不变、改变外涵道出口压力。在外涵节流过程中,设定内涵道出口压力接近双涵试验工况的匹配点压力。

在外涵节流过程中,外涵道内的压力不断增加,通过中介机匣影响风扇背压,使风扇的工作点沿特性线向左支移动。采用相同的程序、网格和进口边界条件,同时提高中介机匣内、外涵出口压力计算得到风扇特性。采用相同程序和网格,在进口标准大气条件下,通过CDFS和高压压气机组成的核心压气机内外涵出口节流计算得到CDFS和高压压气机基准特性。外涵节流时的风扇、CDFS和高压压气机特性(双涵模式)如图3所示。外涵压力通过第1外涵影响CDFS出口/高压压气机进口压力,使高压压气机进口压力不

断提高,在内涵进、出口压力不变的计算条件下,高压压气机压比呈下降趋势。CDFs的工作状态受风扇出口环境(温度、压力)、外涵环境和高压压气机工作状态的共同影响,工况变化较为复杂。外涵节流虽然直接导致 CDFS 出口背压提高,但风扇出口/CDFS 进口压力、温度也同时升高,在各项因素的综合作用下,CDFS 匹配进口换算转速降低,匹配点向特性图的左下方移动,外涵节流时 CDFS、高压压气机换算转速的变化(双涵模式)如图 4 所示。

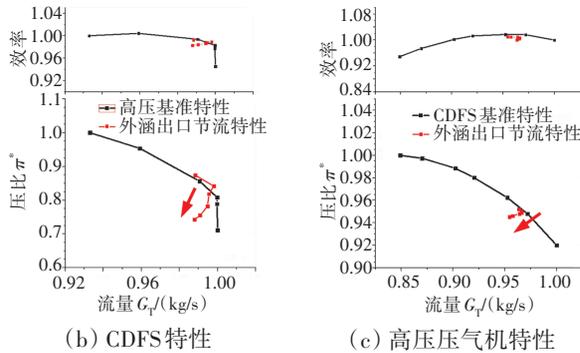
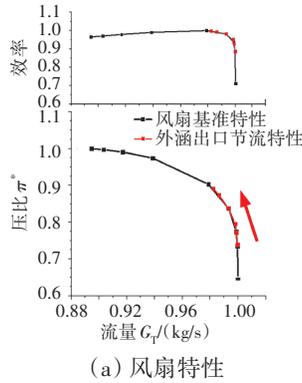


图 3 外涵节流时的风扇、CDFS 和高压压气机特性(双涵模式)

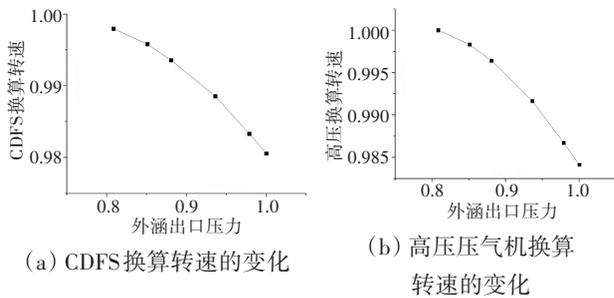


图 4 外涵节流时 CDFS、高压压气机换算转速的变化(双涵模式)

从图 3、4 中可见,在整个压缩系统中,外涵节流导致风扇匹配点明显提高,向喘振边界移动;CDFS 匹配点变化相对较小,向特性图的左下方移动;高压压气机匹配点明显向堵塞边界移动。值得注意的是,随着外涵出口背压的提高,虽然各部件的匹配工况均未到达自身基准特性的喘振边界,但计算已经不能收敛。因此,对压缩系统中各个部件的性能和流场参数进行了分析,发现随着外涵出口背压的提高,风扇涵

道比显著降低直至接近 0,此时外涵出口流场产生较大分离区,导致计算无法收敛。涵道比随外涵背压的变化(双涵模式)如图 5 所示,高外涵背压下的中介机匣内部流场如图 6 所示。针对该问题,本文选取风扇和中介机匣作为计算域,对比内外涵同时节流和单独外涵节流 2 种情况下的性能差异。计算结果表明,2 种节流方式虽然都使风扇工作点沿自身基准特性向左支移动,但同样风扇压比对应的涵道比是不同的,2 个涵道同时节流,风扇涵道比变化较低,而只有外涵节流时,风扇涵道比显著降低,当涵道比较低甚至接近 0 时,继续提高外涵背压,外涵出口流场会急剧恶化(图 6),计算无法收敛,进而导致单独外涵节流时风扇所能达到的最高压比低于其自身基准特性的喘点压比,其特性线比其自身基准特性线短。

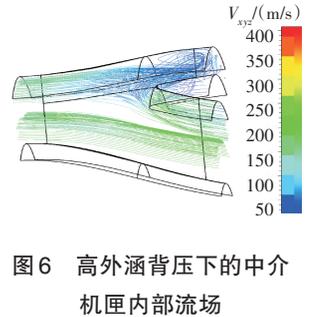
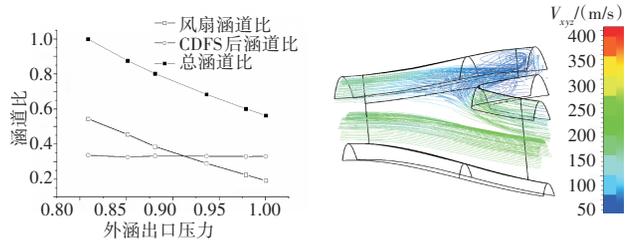


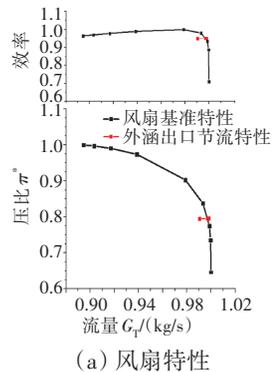
图 5 涵道比随外涵背压的变化(双涵模式) 图 6 高外涵背压下的中介机匣内部流场

根据上述计算分析,认为风扇的喘振裕度,以及风扇在极限涵道比下的出口流动分离将决定整个压缩系统外涵调节的极限。

根据图 5 以及外涵节流时的部件特性可知,在外涵节流过程中,风扇外涵流量明显降低,风扇涵道比和压缩系统的总涵道比呈减小趋势,CDFS 和高压压气机流量略有降低,CDFS 后涵道比呈略有增大的趋势。

3.2 双涵模式下的内涵节流特性

内涵节流是指外涵道出口压力保持不变、改变内涵道出口压力。在内涵节流过程中,设定外涵道出口压力接近双涵试验工况的匹配点压力,由于外涵道内的静压基本不变,因此风扇匹配点基本不变,内涵节流时的风扇特性(双涵模式)如图 7 所示。随着内涵背压的提高,CDFS 和高压压气机的工作点沿特性线向左支移动。内涵节



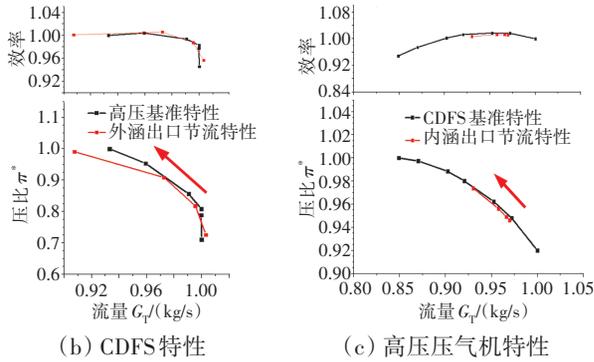


图7 内涵节流时的风扇、CDFS和高压压气机特性
(双涵模式)

流时的风扇、CDFS和高压压气机特性(双涵模式)如图8所示。由于内涵节流时风扇工作点基本不变,因此CDFS进口换算转速基本不变,而CDFS工作状态的提高导致高压换算转速呈下降趋势,这也是内涵节流过程中高压压气机特性比基准特性流量裕度偏高的原因。

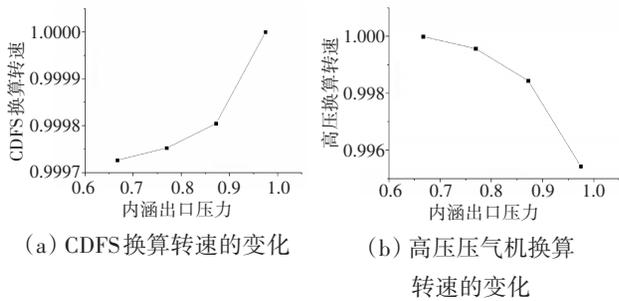


图8 内涵节流时CDFS、高压压气机换算转速的变化
(双涵模式)

从图7、8中可见,在整个压缩系统中,内涵节流导致CDFS和高压压气机工作状态明显提高,向喘振边界移动,高压压气机首先到达喘振边界,其喘振裕度是制约整个压缩系统喘振裕度的关键。

在内涵节流过程中,由于风扇工作状态基本不变,因此压缩系统的总流量基本不变,内涵背压提高使CDFS和高压压气机流量降低,因此压缩系统的总涵道比、风扇涵道比和CDFS后涵道比均呈上升趋势,涵道比随外涵背压的变化(双涵模式)如图9所示。

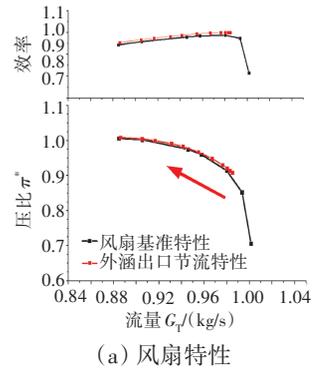
图9 涵道比随外涵背压的变化(双涵模式)

3.3 在单涵模式下的外涵节流特性分析

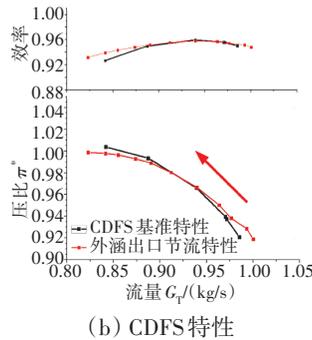
对于在单涵模式下的计算网格(图2(b)),此时模式选择阀门关闭,风扇出口气体均经中介机匣流入

内涵。在保持内涵道出口压力为单涵试验匹配压力的情况下,改变外涵道出口压力,得到外涵节流时的风扇、CDFS和高压压气机特性(单涵模式)如图10所示,外涵节流时CDFS、高压压气机换算转速的变化(单涵模式)如图11所示。从图10、11中可见,外涵背压的提高会影响CDFS和风扇的工作状态,风扇和CDFS的匹配点均沿特性线向左移动。对于本算例,风扇和CDFS的匹配工况

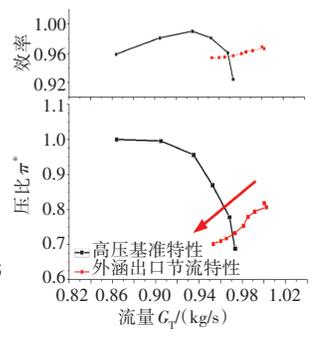
几乎同时到达自身特性的喘振边界,进而引起整个压缩系统的失稳。在内涵进出口压力不变的计算条件下,高压压气机压比呈下降趋势(图11(b))。随着风扇和CDFS工作状态的提高,CDFS和高压压气机进口换算转速均呈下降趋势。



(a) 风扇特性

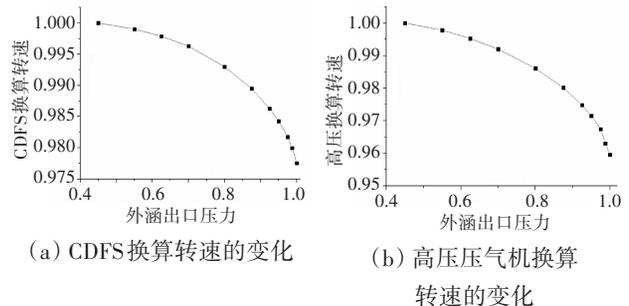


(b) CDFS特性



(c) 高压压气机特性

图10 外涵节流时的风扇、CDFS和高压压气机特性
(单涵模式)



(a) CDFS换算转速的变化 (b) 高压压气机换算转速的变化

图11 外涵节流时CDFS、高压压气机换算转速的变化
(单涵模式)

在单涵模式外涵节流过程中,风扇、CDFS和高压压气机的流量均呈降低趋势,压缩系统总涵道比(即CDFS后涵道比)的变化也呈减小趋势,涵道比随外涵背压的变化(单涵模式)如图12所示。

3.4 单涵模式下的内涵节流特性

在保持外涵道出口压力为单涵试验匹配压力的情况下,改变内涵道出口压力,得到内涵节流时风扇、CDFS 和高压压气机特性(单涵模式)如图 13 所示,内涵节流时 CDFS、高压压气机换算转速变化(单涵模式)如图 14 所示。从图 13、14 中可见,在内涵节流过程中,风扇、CDFS 和高压压气机的匹配点均呈现沿特性线向左支移动的趋势。其中,高压压气机匹配点上升最为明显, CDFS 次之,风扇匹配点上升较小。高压压气机首先到达喘振边界,其喘振裕度是制约整个压缩系统喘振裕度的关键。由于风扇和 CDFS 匹配点的提高, CDFS 和高压压气机换算转速均呈略有下降的趋势。

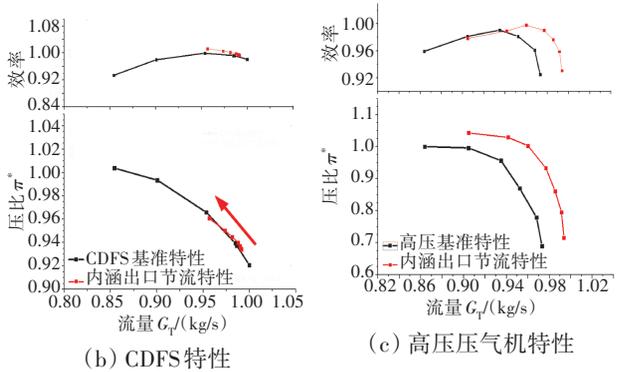


图 13 内涵节流时风扇、CDFS 和高压压气机特性(单涵模式)

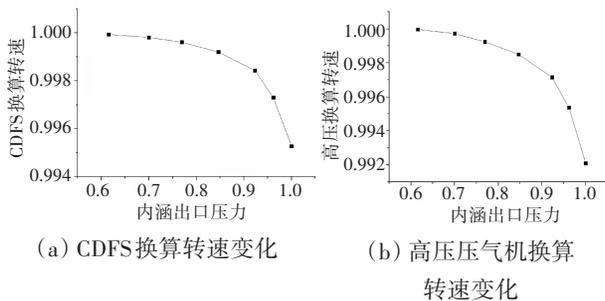


图 14 内涵节流时 CDFS、高压压气机换算转速变化(单涵模式)

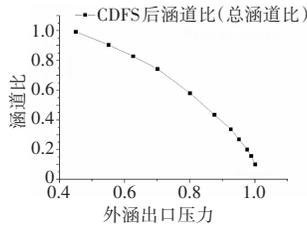


图 12 涵道比随外涵背压的变化(单涵模式)

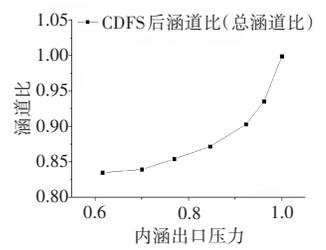


图 15 涵道比随内涵背压的变化(单涵模式)

在该内涵节流过程中,压缩系统的进口总流量变化较小,内涵背压提高使高压压气机流量降低,压缩系统的总涵道比呈上升趋势,涵道比随内涵背压的变化(单涵模式)如图 15 所示。

从图 14(b)中可见,在高、低压压缩系统联合仿真中,通过内涵节流得到的高压压气机特性与其自身基准特性存在一定的差异。高压压气机基准特性是采用相同的程序和网格,在 CDFS 与高压压气机、前涵道构成的核心压气机计算域中通过高压压气机出口节流计算得到。因此,本文分别针对变循环压缩系统和核心压气机 2 种计算域,对比 CDFS 进口换算转速同时的高压压气机进口流场参数,如图 16 所示。从图中可见,在 2 种计算域条件下,高压压气机进口总压的径向分布接近,总温的径向分布差异较大,进口绝对马赫数和绝对气流角存在一定的差异。在压

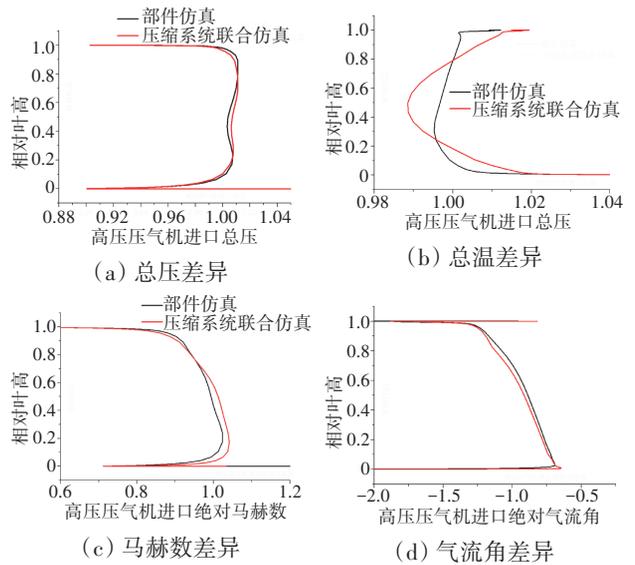


图 16 高压压气机进口总压、总温、马赫数和气流角差异

缩系统联合仿真中,根尖总温偏高、叶中总温偏低(图 16(b)),而在 CDFS 与高压压气机构成的核心压气机仿真中总温的径向分布相对均匀,本文认为产生该种差异的主要原因在于压缩系统联合仿真中带有更多低压部件(风扇和中介机匣),部件中根尖产生的流动损失比叶中偏大,因此温升偏高,累积到高压压气机进口则表现为根尖总温偏大。因此,压缩系统联合仿真表明,受高压压气机进口总温分布的影响,高压压气机在压缩系统中表现出来的匹配特性可能与自身

基准特性有一定的差异,进而使压缩系统的匹配及涵道比与预期存在偏差。

4 结论

(1)在单、双涵模式下,通过联合仿真得到的各部件匹配压比均与试验值相当,外涵道损失偏差在4%以内,但各部件的流量偏差较大。

(2)在单、双涵模式下的内、外涵出口节流计算表明:在外涵节流时,风扇或CDFs的喘振裕度是制约整个压缩系统喘振裕度的关键;在内涵节流时,高压压气机的喘振裕度是制约整个压缩系统喘振裕度的关键。

(3)各部件在联合仿真中表现出了更强的流动耦合性,可能导致联合仿真中体现的部件特性与基准特性存在一定差异。本文中极限调节下的中介机匣流场恶化、前端部件导致的高压压气机进口总温分布不均匀分别导致风扇、高压压气机匹配特性与自身基准特性的偏差。

参考文献:

- [1] Kurzke J. The mission define the cycle: turbojet, turbofan and variable cycle engine for high speed propulsion[R]. RTO-EN-AVT-185.
- [2] Allan R D. Advanced supersonic propulsion system technology study, phase 2[R]. NASA-CR-134913.
- [3] 方昌德. 变循环发动机[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(3): 1-5.
FANG Changde. Variable cycle engines[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(3): 1-5. (in Chinese)
- [4] French M. NASA VCE test bed engine aerodynamic performance characteristics and test results[R]. AIAA-81-1594.
- [5] 赖安卿, 胡骏, 屠宝锋. 核心机驱动风扇级气动设计方案[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2229-2238.
LAI Anqing, HU Jun, TU Baofeng. Scheme on aerodynamic design of core driven fan stage[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9): 2229-2238. (in Chinese)
- [6] 方昌德. 航空发动机的发展研究[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 124-129.
FANG Changde. The development of aeroengine research[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 124-129. (in Chinese)
- [7] Huang G P, Li C, Xia C, et al. Investigations of entrainment characteristics and shear-layer vortices evolution in an axisymmetric rear variable area bypass injector[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(4): 230-244.
- [8] Wang R Y, Liu B J, Xia C, et al. The exploration of bypass matching limitation and mechanisms in a double bypass engine compression system[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119: 107225-1-14.
- [9] 刘大响. 对加快发展我国航空动力的思考[J]. 航空动力学报, 2001, 16(1): 1-7.
LIU Daxiang. Deliberation upon advance of aeroengine development in China[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(1): 1-7. (in Chinese)
- [10] 张鑫, 刘宝杰. 核心机驱动风扇级的气动设计特点分析[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 434-442.
ZHANG Xin, LIU Baojie. Analysis of aerodynamic design characteristics of core driven fan stage[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 434-442. (in Chinese)
- [11] 张鑫, 刘宝杰. 紧凑布局核心机驱动风扇级设计参数影响分析[J]. 推进技术, 2011, 32(1): 47-53.
ZHANG Xin, LIU Baojie. Analysis of the core driven fan stage with compact aerodynamic configuration[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(1): 47-53. (in Chinese)
- [12] 张鑫, 刘宝杰. 核心机驱动风扇级在非设计模式下的匹配方法研究[J]. 推进技术, 2014, 35(3): 320-327.
ZHANG Xin, LIU Baojie. Investigation of a methodology for the CDFS matching in the non-design operating mode [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(3): 320-327. (in Chinese)
- [13] 刘宝杰, 贾少锋, 于贤君. 变循环核心压气机可调特性的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 39(9): 1850-1855.
LIU Baojie, JIA Shaofeng, YU Xianjun. Numerical study of the characteristics of a variable cycle core compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 39(9): 1850-1855. (in Chinese)
- [14] 刘宝杰, 贾少锋, 于贤君. 变循环发动机前可调面积涵道引射器的通流计算方法[J]. 推进技术, 2017, 38(8): 1689-1698.
LIU Baojie, JIA Shaofeng, YU Xianjun. Through flow calculation method of variable cycle engine forward variable area bypass injector [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(8): 1689-1698. (in Chinese)
- [15] 刘宝杰, 贾少锋, 于贤君. 变循环压缩系统的一体化通流设计方法[J]. 航空动力学报, 2016, 31(11): 2750-2756.
LIU Baojie, JIA Shaofeng, YU Xianjun. Integrated through flow design method of variable-cycle compression system[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(11): 2750-2756. (in Chinese)
- [16] 马昌友, 侯敏杰, 幸晓龙. 涵道比调节对核心机驱动风扇级与高压压气机匹配性能影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 392-401.
MA Changyou, HOU Minjie, XING Xiaolong. Effects of bypass ratio on the matching performance between core driven fan stage and high pressure compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(2): 392-401. (in Chinese)
- [17] 马昌友, 侯敏杰, 梁俊, 等. 核心机驱动风扇级与高压压气机匹配试验中外涵排气系统的设计与试验验证[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(1): 6-11.
MA Changyou, HOU Minjie, LIANG Jun, et al. Design and test verification of bypass exhaust system for core driven fan stage in the matching environment of high pressure compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(1): 6-11. (in Chinese)

(编辑: 兰海青)