

文章编号: 1000-8055(2022)10-2090-14

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220248

考虑复杂涵道影响的变循环发动机压缩系统 一体化性能评估方法

王若玉¹, 于贤君^{1,2}, 梁彩云³, 孟德君³, 安广丰^{1,2}, 刘宝杰^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 102206;

2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 102206;

3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 基于双外涵变循环发动机压缩系统, 分析了多连通气动布局变循环压缩系统的匹配工作机制。一体化全三维数值模拟表明: 变循环压缩系统各压缩部件与涵道及其调节机构之间由于多连通特征相对于常规发动机压缩系统具有更强的耦合作用特点, 高效的外涵道流动是发挥变循环发动机性能优势的关键。涵道几何的调节不仅会改变其自身流动状态, 还伴随着压缩部件气动性能的偏移, 模式转换过程必须符合各涵道及调节机构之间的气动协调匹配。提出了适用于多连通变循环压缩系统的一体化变维度分析方法, 将部件通流程序与涵道零维程序相结合, 实现了部件-涵道耦合匹配关系的快速分析。基于变维度分析方法给出了单外涵模式部件与涵道共同约束下的压缩系统综合匹配可行域, 旨在为变循环发动机的匹配设计提供理论依据。

关 键 词: 变循环发动机; 压缩系统; 复杂涵道; 耦合工作; 匹配

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Integrated performance evaluation method for variable cycle engine compression system considering influence of complex bypass

WANG Ruoyu¹, YU Xianjun^{1,2}, LIANG Caiyun³, MENG Dejun³,
AN Guangfeng^{1,2}, LIU Baojie^{1,2}

(1. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 102206, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine
Aero-thermodynamics, Beihang University, Beijing 102206, China;

3. Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The matching of the double bypass engine compression system was investigated to reveal the operating mechanism of the multi-connected compression system of the variable cycle engine. Three-dimensional numerical simulation showed that there was a strong coupling between the compression components, the bypass ducts, and the bypass regulation mechanisms. A well-organized bypass flow was a key for the variable cycle engine to exhibit its aerodynamic advantage. The adjustment of the bypass regulation mechanism not only changed the flow state of the bypass but also influenced the matching state of the compression components, hence the mode transition required for the cooperation of all components.

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-II-0020-0041)

作者简介: 王若玉(1993—), 女, 博士, 主要从事叶轮机械气动热力学研究。

通信作者: 于贤君(1980—), 男, 副研究员、博士生导师, 博士, 主要从事叶轮机械气动热力学研究。E-mail: yuxianjun@buaa.edu.cn

引用格式: 王若玉, 于贤君, 梁彩云, 等. 考虑复杂涵道影响的变循环发动机压缩系统一体化性能评估方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2090-2103. WANG Ruoyu, YU Xianjun, LIANG Caiyun, et al. Integrated performance evaluation method for variable cycle engine compression system considering influence of complex bypass [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2090-2103.

To realize fast matching analysis of the multi-connected compression system, an integrated variable-dimensional analysis method for variable cycle compression system was proposed by combining the component through flow program with the zero-dimensional bypass program. The feasible region of the compression system for the single bypass mode was deduced based on the variable-dimensional analysis method, thus providing the theoretical basis for the matching design of variable cycle engines.

Keywords: variable cycle engine; compression system; complex bypass; coupling work; matching

变循环发动机能够通过调节自身几何实现小涵道比(接近涡喷)和大涵道比两种循环方式,有效拓宽飞机的工作包线,是当下航空发动机领域的前沿热点和难点。随着 2021 年美国 XA100 和 XA101 自适应循环发动机初步测试的相继成功,采用变循环发动机作为下一代战机的动力装置已成为行业的普遍共识^[1-2]。

灵活可调的压缩系统是发动机实现变循环功能的关键,采用分段式、多涵道的气动布局是各种变循环发动机压缩系统的共同特征^[3-7]。不同压缩系统气动布局方案的核心思路都是通过对涵道比的大幅调节,在不明显改变发动机进口流量的前提下改变发动机的整机增压比,从而实现不同飞行任务需求下推力和效率的协调匹配。多涵道气动布局是压缩系统为了实现变循环功能的必然选择,变循环的核心问题之一是变涵道比。

为了实现涵道比的大范围调节,变循环压缩系统引入了模式选择阀门(mode selector valve, MSV)和可变面积涵道引射器(variable area bypass injector, VABI)等专门用于控制涵道分流与汇流过程的调节机构。在不同的发动机工作状态下,各调节机构相互配合,通过改变涵道的几何流通面积实现发动机所需要的流量分配^[8-11]。变循环压缩系统涵道比的调节过程就是发动机内部流体在涵道调节机构的作用下发生一系列分流和汇流的过程。当分流和汇流流动在压缩系统的同一个流动管道发生时,必然会产生多连通效应,即汇流处的高总压流动会通过连通的管道直接影响上游分流流动前部件的工作状态,这也是变循环发动机的压缩系统相对于传统的压缩系统需要面临的新的耦合工作问题。当前针对多连通压缩系统流动特性的研究主要围绕分流与汇流两种过程展开,所建立的大量模型也主要着眼于孤立的涵道调节机构,在模式选择阀门和涵道引射器的工作机理及设计方法上取得了丰硕的成果^[12-17]。美国学者的分析表明,由于多连通特征,有可能导致双外涵变循环发动机的外涵道出现明显的倒流,增

大外涵损失,从而导致变循环发动机丧失变涵道比带来的性能优势^[18]。

对于变循环压缩系统的匹配规律设计而言,厘清复杂涵道分流与汇流过程的关联及涵道与部件的匹配工作机制更为重要,为此必须对压缩系统的涵道与部件联立分析。基于发动机控制方程的一体化分析虽然能够定性分析压缩系统的匹配规律^[19-22],但由于总体分析中使用的涵道与部件模型高度简化、各模型之间相对独立,因此难以考虑耦合工作条件下涵道几何及局部流动细节变化导致的气动性能偏移。当前对变循环压缩系统的耦合工作真实物理流动机理的认识还有待于进一步深入研究,对于多连通环境下部件与涵道间约束关系认知尚不够清晰。如何实现多连通特征、高调节自由度变循环压缩系统气动性能的一体化快速分析是变循环压缩系统匹配设计亟待解决的关键难题。

本文针对变循环发动机压缩系统的多连通气动布局特征,以双外涵变循环发动机压缩系统为研究对象,探讨其耦合匹配工作机制其气动性能评估方法。首先通过压缩系统的一体化全三维数值模拟,探究涵道流路设计及模式选择阀和涵道引射器调节对压缩系统气动性能的影响;进而借助一体化通流计算实现部件匹配状态的快速计算,研究压缩系统各部件的匹配工作机制;在此基础上,通过将通流程序与涵道零维程序有机结合,提出了变循环压缩系统的一体化变维度分析方法,并利用该方法初步分析了单外涵模式下涵道与部件的匹配工作关系,给出了涵道与部件特性共同约束下的压缩系统综合可行域,为多连通压缩系统的匹配设计提供了理论依据。

1 涵道和调节机构对压缩系统工作特性的影响

1.1 模型及数值计算方法

本文所涉及的双外涵变循环发动机压缩系统如图 1 所示,包含风扇(fan)、核心机驱动风扇

(CDFS)和高压压气机(HPC)三个压缩部件,其涵道调节机构包括第二外涵道入口的模式选择阀门(MSV)和第一、二外涵道汇流区的前可变面积涵道引射器(FVABI)。MSV采用俯仰调节,从完全关闭到完全开启其开度 A_{MSV} 调节范围为0~1;FVABI采用轴向调节,将第一、二外涵道的流通面积比定义为其开度,用 A_{FVABI} 表示。

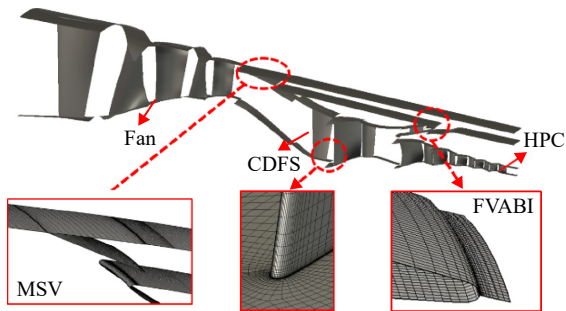


图1 变循环发动机压缩系统的几何模型与网格

Fig. 1 Geometric model and mesh of variable cycle engine compression system

采用 NUMECA 软件的 AutoGrid 模块进行压缩系统叶片区域网格划分,叶片通道区采用 O4H 型拓扑结构,叶尖间隙处采用蝶形拓扑结构。对于涵道及其调节机构,采用 IGG 模块进行网格划分,所有网格均为结构化六面体网格。为了提高计算精度,充分捕捉流场细节,对机匣、轮毂和叶片表面等壁面以及 MSV、FVABI 等区域的网格进行了局部加密处理,计算域网格总数约为 1 500 万,经验证该网格密度能够满足双外涵压缩系统的气动性能的计算精度需求^[23]。采用 NUMECA 软件 FINE/Turbo 模块对压缩系统全三维模型进行定常数值模拟研究,参照公开文献^[24-26]中对多级压气机的计算方法的相关校验,选用 Spalart-Allmaras 湍流模型,时间项以 4 阶 Runge-Kutta 进行离散,而空间项的离散则选用 2 阶中心差分法,压缩系统内各转/静子交界面均采用掺混面模型进行处理。在计算域的进口给定来流的总压(101 325 Pa)、总温(288.15 K)和气流方向(轴向进气),在计算域各出口(包括外涵道出口和内涵道出口)施以静压边条,所有固体壁面(包括叶片表面、轮毂表面、机匣表面等)均设置为绝热、无滑移边界。

1.2 涵道流路设计对压缩系统气动性能的影响

涵道作为调节变循环发动机压缩系统流量分配的重要部分,其内部流动的组织与其流路设计密切相关。现有研究多关注压气机部件的流道设计,而对涵道的设计分析相对较少,对涵道几何

的影响了解不够充分。为了研究涵道流路设计对变循环发动机压缩系统气动性能的影响,对比分析压缩系统涵道流路改型前后的匹配特性。如图 2(a)所示,原型方案(ORI)中,压缩系统第二外涵道的轮毂型线与 CDFS 的机匣型线重合,第一外涵道出口呈突扩形式,第二外涵道及第一、二外涵道汇流区均存在明显的容腔结构。改型方案(MOD)消除了涵道的突扩,使得涵道流路趋于平缓,上、下游过渡更为光滑,如图 2(b)所示。图 2 中各序号标识出的截面表示下文分析中流场参数的提取位置。

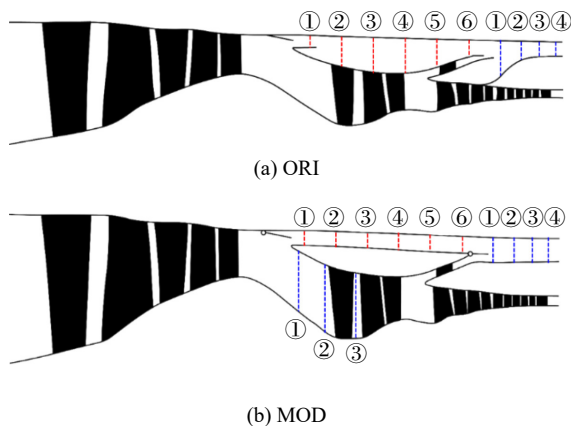


图2 压缩系统改型前后的涵道流路

Fig. 2 Comparison of bypass flow path of compression system before and after modification

1.2.1 单外涵模式

首先研究单外涵模式下涵道流路几何对压缩系统气动性能的影响,计算方案如表 1 所示,其中 p_{inner} 和 p_{outer} 分别表示压缩系统的内、外涵道出口的相对压力,以单外涵模式设计点做无量纲处理, n_{low} 和 n_{high} 分别表示低压轴与高压轴的相对物理转速。通过调节外涵道出口背压,分析不同涵道流路方案压缩系统的外涵道节流特性。

表 1 涵道流路的影响计算方案(单外涵)

Table 1 Calculation scheme to investigate the influence of bypass flow path (single bypass)

参数	数值
低压轴相对物理转速 n_{low}	1.0
高压轴相对物理转速 n_{high}	1.0
CDFS 进口导叶开度 $\alpha_{VIGV}/(^{\circ})$	0
A_{FVABI}	0.43
内涵相对出口背压 p_{inner}	1.0
外涵道相对出口背压 p_{outer}	0.78~1.33

为了定量地评估流体经第一外涵道进入总外涵道向下游发展过程中的损失水平,在第一、二外涵道出口的总外涵道汇流区设置 4 个监测截面,分析总压沿流向的变化情况,监测截面的位置在图 2 中标出,总压变化趋势如图 3 所示,图中的总压 p^*/p_{ref}^* 是基于各工况下涵道进口的平均总压做无量纲处理的结果,横坐标与监测截面的位置相互对应。研究表明,随着流动向下游发展,两种方案的总压均呈下降趋势,且外涵道出口压力越低,汇流区的压降幅度越大。以 ORI 方案为例, $p_{\text{outer}}=1.33$ 时截面 4 到截面 1 的总压恢复系数高达 0.996,而 $p_{\text{outer}}=0.78$ 时的总压恢复系数仅为 0.898。对比两流路方案的外涵道总压变化情况还可以发现,MOD 方案的外涵道损失明显低于 ORI 方案,且 p_{outer} 越低,MOD 方案的优势越明显, $p_{\text{outer}}=0.78$ 时,MOD 方案截面 4 的总压恢复系数较 ORI 方案高出了 2 个百分点。上述分析表明,单外涵模式下涵道流路的改型能够有效改善压缩系统外涵道的流动特性,降低相应区域的流动损失。

图 4 对比了两涵道流路方案压缩系统的外涵效率随总涵道比 B 的变化规律,图中的效率 η^* 为

滞止等熵效率。研究结果表明,涵道流路改型后,压缩系统的外涵效率在 $B>0.12$ 的范围内均明显高于原型方案。当 $B>0.2$ 时,MOD 方案相对于 ORI 方案的效率优势接近 10 个百分点,从而证明了涵道流路设计对保障压缩系统气动性能的重要性。当 $B<0.12$ 时,MOD 方案的外涵道效率略低于 ORI 方案,其原因主要是改型方案的风扇匹配效率偏低($B=0.08$ 时,MOD 方案风扇效率较 ORI 方案偏低 3 个百分点),导致外涵道效率的计算值减小,与涵道自身的流动状态无关。

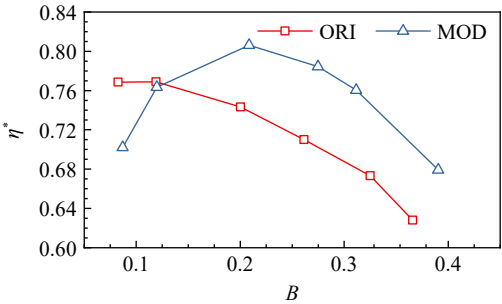


图 4 单外涵模式下压缩系统外涵效率随总涵道比的变化
Fig. 4 Variation of outer bypass efficiency of compression system with total bypass ratio under the single bypass mode

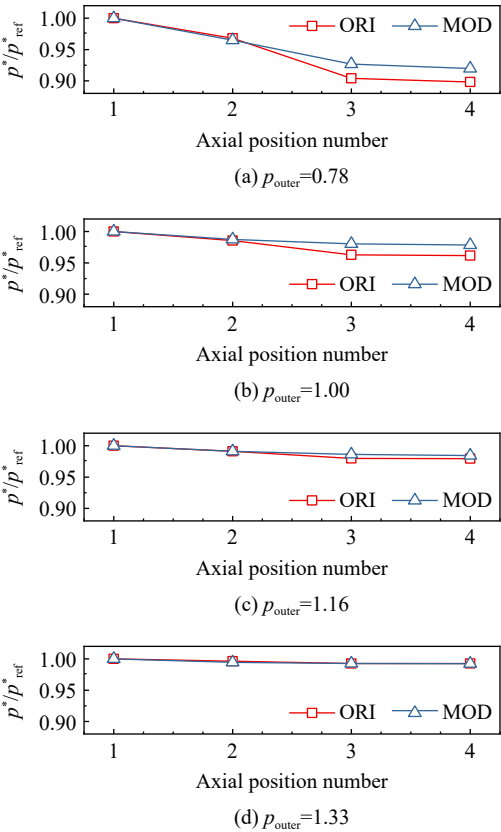


图 3 单外涵模式下外涵道汇流区总压沿流向的分布
Fig. 3 Distribution of total pressure along the downstream of the combining surface of bypass for the single bypass mode

1.2.2 双外涵模式

下面分析双外涵模式下涵道流路几何对压缩系统气动性能的影响。在双外涵模式下,MSV 打开,CDFS 进口导叶关闭 40° 以适应压缩系统内流量分配的变化,计算方案如表 2 所示,保持其他控制参数不变,分析压缩系统的外涵道节流特性。表 2 中内、外涵道的相对出口压力用双外涵模式设计点的参数进行无量纲处理。

为了分析不同涵道流路方案中第二外涵道流动的损失水平,在第二外涵道内沿流动方向自上游至下游依次选取了 6 个截面(见图 2),提取了各截面的平均总压,如图 5 所示。研究表明,

表 2 涵道流路的影响计算方案 (双外涵)	
Table 2 Calculation scheme to investigate the influence of bypass flow path (double bypass)	
参数	数值
低压轴相对物理转速 n_{low}	1.0
高压轴相对物理转速 n_{high}	0.96
CDFS 进口导叶开度 $\alpha_{\text{VIGV}}/(\circ)$	40
A_{FVABI}	0.43
内涵相对出口背压 p_{inner}	1.0
外涵道相对出口背压 p_{outer}	0.83~1.23

受流体黏性和内部耗散作用的影响,压缩系统第二外涵道的总压随着流动向下游发展均呈现出递减的趋势,但 ORI 方案来流总压的降幅远高于改型后的 MOD 方案: $p_{\text{outer}}=0.83$ 时,MOD 方案截面 6 到截面 1 的总压恢复系数高于 0.99,而同等条件下 ORI 方案的总压恢复系数不足 0.98。对比不同外涵道出口背压方案的计算结果还可以发现,随着 p_{outer} 的提高,第二外涵道内总压的降幅明显减小,流体在第二外涵道内的流动损失降低,其原因是外涵道出口背压的增大使得第二外涵道的流量减小,从而减小了相应区域的流通马赫数,削弱了主流与回流区流场的剪切强度。

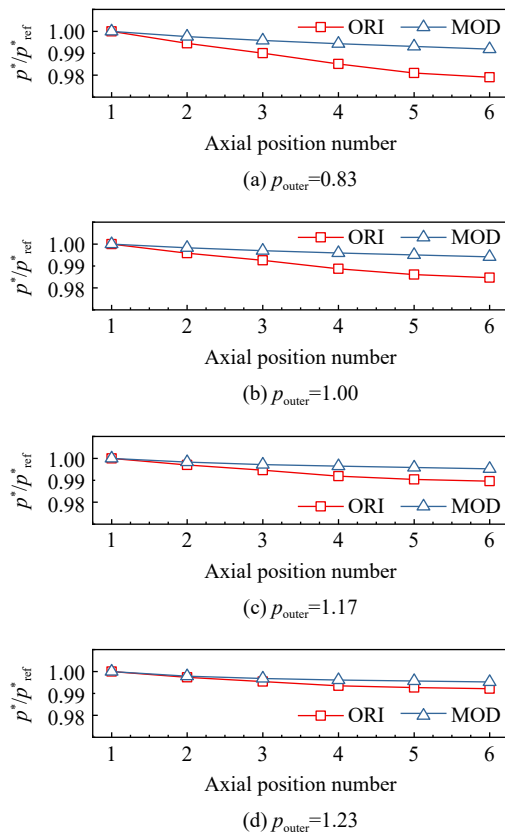


图 5 双外涵模式第二外涵道总压沿流向的分布

Fig. 5 Distribution of total pressure along the downstream of second bypass for the double bypass mode

图 6 给出了第一、二外涵道出口汇流区总压沿流向的变化情况,截面位置见图 2。在不同的外涵道出口背压下,MOD 方案各监测截面的总压恢复系数均高于 ORI 方案,表明改型后的涵道方案有效降低了第一、二外涵道的汇流流动损失,有助于提高压缩系统的总体效率水平。值得注意的是,ORI 方案中 FVABI 下游截面 4 的总压相对于截面 3 略有升高,其原因主要是截面 3 下半部

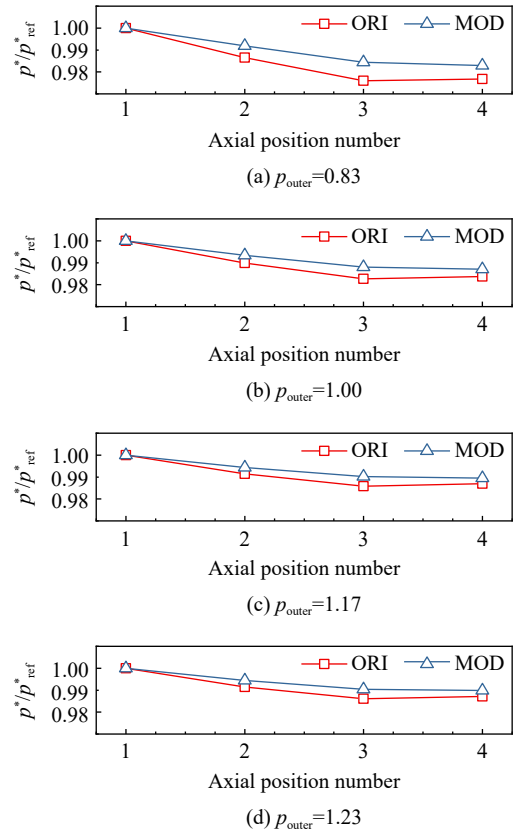


图 6 双外涵模式外涵道汇流区总压沿流向的分布

Fig. 6 Distribution of total pressure in the downstream of the combining surface of bypass for the double bypass mode

分区域位于总涵道近轮毂的回流区内,该区域的总压偏低,从而降低了截面 3 的总压平均值。

在部件匹配工作范围一定的情况下,涵道流路几何形式决定了其内部流动组织情况,并影响其流通能力。图 7 对比了两种涵道流路方案的涵道比随着外涵道出口背压的变化规律,图中 B_1 、 B_2 分别表示第一外涵道比和第二外涵道比。研究表明,压缩系统的涵道比随着外涵道出口背压的提高而降低,由于改型后的涵道流路具有更低的损失水平,因此获得了更强的流通能力。在相同的外涵道出口背压下,MOD 方案第一、第二外涵道比均高于 ORI 方案,其中第二外涵道比的增加直接来源于其内部特性流动的改善,而第一外涵道比的收益则来源于涵道总流通能力的增强。

本部分研究表明,涵道流路不但控制着变循环发动机压缩系统内部的流量分配,决定各部件的匹配工作状态,其流动特性与损失水平也影响整个压缩系统的匹配过程,并进一步影响发动机的总体性能。性能优良的变循环发动机需要对涵道流路进行细致的设计,在考虑几何约束的前提

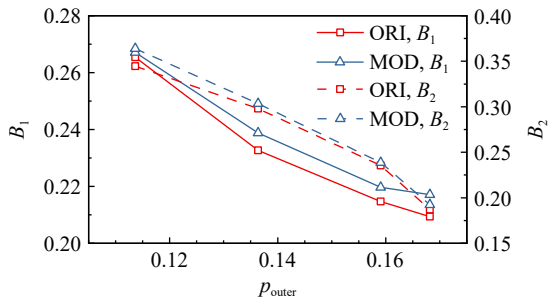


图 7 不同涵道流路方案压缩系统的涵道比随外涵道背压的变化规律

Fig. 7 Variation of bypass ratio of compression system with bypass backpressure for different flow path schemes

下, 需要根据部件与涵道的匹配关系对其涵道的内部流动予以精心组织。

1.3 多连通特征环境下涵道变几何调节对压缩系统气动性能的影响

变循环发动机压缩系统的涵道具有显著的变几何特征, 其气动特性与涵道调节机构的几何状态直接相关。本节将基于改型的涵道流路, 研究一体化匹配环境下 MSV 和 FVABI 调节对压缩系统气动性能的影响, 并重点分析在多连通特征情况下出现的模式选择阀门倒流流动及其对各部件匹配工作特性的影响。

1.3.1 MSV 调节的影响

为了研究 MSV 调节对变循环压缩系统气动性能的影响, 本节基于压缩系统的全三维模型, 选取了 MSV 开度 $A_{MSV}=0\sim 0.43$ 的一系列工况, 在相同的部件转速和背压条件下对压缩系统的匹配工作状态进行讨论, 计算方案如表 3 所示, MSV 调节过程中压缩部件的转速及导叶开度等控制参数保持不变。

图 8 给出了不同 MSV 开度方案第二外涵道进口分流环附近区域的绝对马赫数云图, 图 9 进一步对比了压缩系统第一外涵道比、第二外涵道比和总涵道比随 MSV 开度的变化规律。结合图 8 中 MSV 分流环的局部流场细节和图 9 中涵道比的变化趋势可知, 在当前匹配工况下直接打开 MSV 将导致第二外涵道倒流, 且倒流流量随着 MSV 开度的增加而不断提高。当 $A_{MSV}\geq 0.17$ 后, 随着 MSV 开度继续增大, 倒流区的扩展速度逐渐放缓。

根据图 9 所示的涵道比的分布规律还可以看出, 随着 MSV 开度的增加, 压缩系统第一、二外涵道比的绝对值不断增大, 但其变化速率逐渐减小。对于压缩系统的总涵道比, 随着 MSV 开度的增加, 总涵道比在第一外涵道比的主导作用下

表 3 压缩系统模式转换过程计算方案设置
Table 3 Calculation scheme setting to investigate the mode transition process of compression system

方案	A_{MSV}	A_{FVABI}	p_{inner}	p_{outer}	n_{low}	n_{high}
工况 1	0					
工况 2	0.09					
工况 3	0.17					
工况 4	0.26	0.43	1.0	1.0	1.0	1.0
工况 5	0.35					
工况 6	0.43					

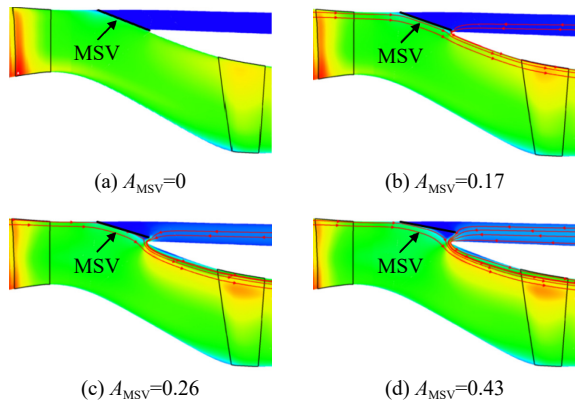


图 8 第二外涵道进口分流环局部的马赫数分布

Fig. 8 Distribution of Mach number near the splitter ring of the second bypass inlet

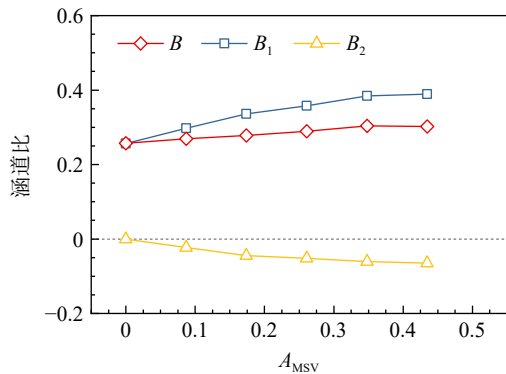


图 9 压缩系统的涵道比随 MSV 开度的变化规律

Fig. 9 Variation of bypass ratio with the opening condition of the MSV of compression system

增大, 但由于第二外涵道倒流分流了一部分进入总外涵道的流量, 总涵道比的数值及变化率均小于第一外涵道比。

图 10 给出了 MSV 调节过程中风扇、CDFS 和高压压气机匹配工作特性的变化规律, 箭头指向 MSV 开度增大的方向, 图中的各部件的流量 ($\dot{m}/\dot{m}_{ref}$)、压比 (π^*/π^*_{ref}) 和效率 (η^*/η^*_{ref}) 均基于设计点性能做了无量纲处理。为了便于对比分析, 图

中同时还给出了各部件单独工作时的等转速特性线。应当指出,由于上游部件的匹配工作状态会影响下游部件的进口条件,并改变下游部件的折合转速,因此部件在压缩系统内的匹配特性与其原特性不重合。如图 10(a)所示,在压缩系统单外涵模式的设计点,风扇匹配在近堵塞状态边界附近,保证了充足的裕度储备,失速裕度高达 26%。打开 MSV 促使风扇匹配点向失速边界移动,解除了风扇的堵塞,改善了其匹配工作效率。与风

扇类似, CDFS 在单外涵模式设计点也匹配在近堵塞状态,具有较低的压比和较大的失速裕度(21%),但 MSV 的开启使得 CDFS 的匹配压比进一步下降,并导致其陷入深度堵塞,效率大幅降低,气动性能显著恶化。受上游风扇和 CDFS 工作状态变化的影响,图 10(c)中高压压气机特性线的形状显著改变,MSV 开度的增加造成高压压气机匹配折合流量下降,该过程中其压比和效率的变化幅度不大。

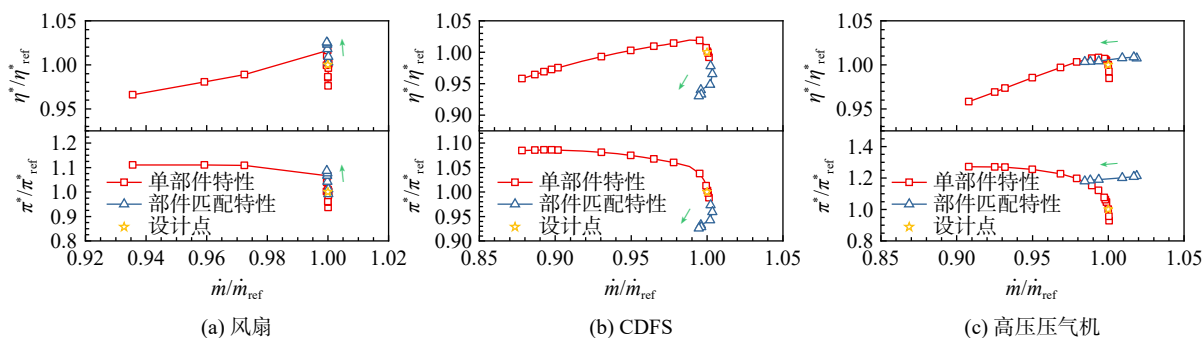


图 10 MSV 调节过程中部件工作点的变化

Fig. 10 Movement component matching point with the regulation of the MSV

1.3.2 FVABI 调节的影响

本节研究 FVABI 开度对压缩系统气动性能的影响。作为 DBE 压缩系统的关键调节部件, FVABI 对第一、二外涵道流动的掺混过程具有重要的控制作用。表 4 归纳了 FVABI 开度调节方案的参数设置, A_{FVABI} 的调节范围为 0.28~0.43, FVABI 调节过程中压缩部件的转速及导叶开度等控制参数均保持不变。

表 4 FVABI 开度调节方案参数设置

Table 4 Parameter setting of calculation scheme to investigate the opening condition of the FVABI

方案	A_{MSV}	A_{FVABI}	p_{outer}	p_{inner}	n_{low}	n_{high}
工况 1		0.43				
工况 2		0.38				
工况 3	0.35	0.33	1.0	1.0	1.0	1.0
工况 4		0.28				

图 11 给出了压缩系统的涵道比随 FVABI 开度的变化规律。随着 FVABI 开度的减小, 第一外涵道出口的通流面积减小, 涵道流通能力下降, 压缩系统的第一外涵道比呈下降趋势。与此同时, 由于压缩系统的第二外涵道比在 FVABI 关闭的过程中几乎不变, 总涵道比呈现出与第一外涵道比相似的变化趋势。

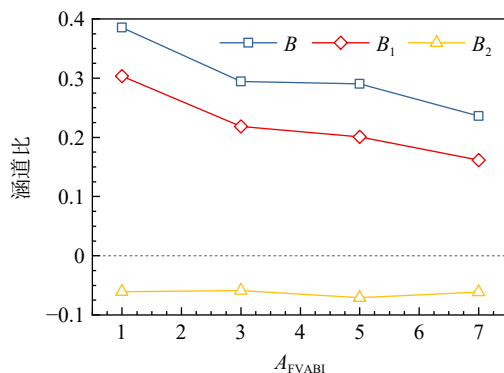


图 11 FVABI 调节过程中压缩系统涵道比的变化

Fig. 11 Variation of bypass ratio with the opening condition of the FVABI of compression system

事实上, 虽然 FVABI 调节过程中压缩系统第二外涵道比的变化较小, 但各部件的工作状态发生了明显改变, 部件间的匹配关系在此过程中也得到了改善。图 12 给出了 FVABI 调节过程中各部件工作点的变化情况, 箭头标识出了 AFVABI 减小的方向。如图 12(a) 和图 12(b) 所示, 随着 FVABI 开度的减小, 风扇和 CDFS 的压比均有所提高, 尤其以 CDFS 的增幅更为显著, 这种变化有利于其退出堵塞状态, 并改善其匹配效率。作为压缩系统中最靠近下游的部件, 高压压气机的气动性能受到上游部件工作状态变化的影响: 一

方面, 由于风扇和 CDFS 的总压比增加, 其进口压力提高; 另一方面, 由于 FVABI 关闭过程中第一外涵道比不断下降, 其进口流量增大。在压缩系

统内涵出口匹配压力不变的条件下, 上述两个因素均使得高压压气机的工作点向堵塞边界偏移, 如图 12(c) 所示。

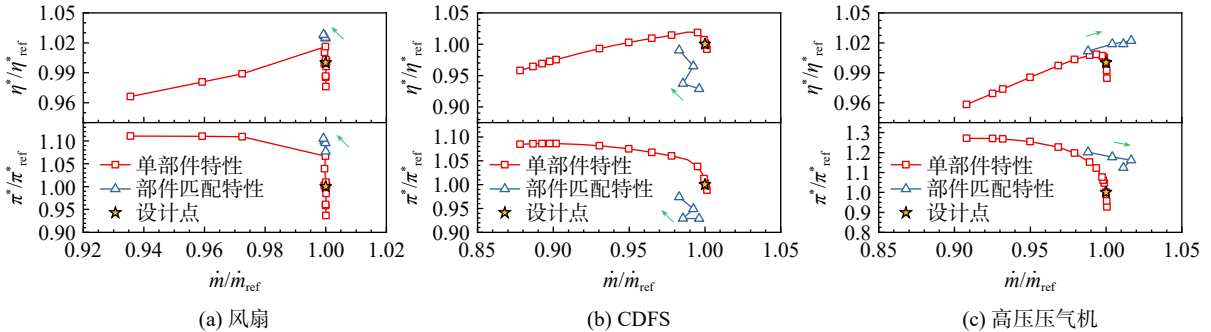


图 12 FVABI 调节过程中各部件工作点的变化规律

Fig. 12 Movement component matching point with the regulation of the FVABI

2 基于变维度分析方法的复杂压缩系统匹配关系快速分析

本文所研究的双外涵变循环压缩系统共有 19 排叶片, 网格超过 1 000 万, 基于 CFD 技术的全三维分析方法虽然能够捕捉压缩系统的内部流动细节, 但三维计算代价高昂, 难以满足复杂变循环发动机压缩系统的一体化分析需求。通过适当的降维, 在二维层面上对压缩系统进行一体化通流计算是当前设计与分析变循环压缩系统唯一有效的便捷途径。

2.1 多涵道压缩系统一体化通流分析程序

针对变循环压缩系统的多连通气动布局特征, 发展了如图 13 所示的模块化压缩系统一体化通流计算程序, 图中的 8 个计算域依次对应于变循环压缩系统的进气道、第三外涵道、风扇、第二外涵道、核心机驱动风扇级(CDFS)、第一外涵道、高压压气机(HPC)和高压压气机外涵道(HPC 外涵道)。计算时, 采用流线曲率法依次求解各计算域, 相邻计算域之间通过传递流场边界条件进行关联。各计算域可自由组合, 用以模拟不同形式的压缩系统, 本文所研究的双外涵变循环压缩系统即为计算域 3~8 的组合。由于本文采用的通流程序具有模块化的架构特征, 能够根据压缩系统各压缩部件的设计特点灵活地进行标定, 对设计特征不同的压缩部件有针对性地选取不同的模型系数, 因此可实现多部件变循环压缩系统高、低压部件气动性能的准确计算。文献 [27] 对通流程序的模型体系进行了详细说明, 而本文的重点在应用该方法发展完整的变循环发动机压缩系统一体化变维度匹配分析方法, 对该程序的特点



图 13 多涵道压缩系统的通流计算模型

Fig. 13 Throughflow calculation model of the multi-channel compression system

和使用过程不做详细赘述。

2.2 通流程序的校验

本节将对一体化通流程序进行校验, 校验对象包括一个跨声风扇和一个高压压气机, 负荷系数的变化范围涵盖了变循环压缩系统中可能遇到的各种情况。

2.2.1 低压端部件的校验

基于 NASA Stage 37 对通流程序在压缩系统低压端部件的计算可靠性进行校验。Stage 37 是一个高压比高性能压气机的进口级实验件, 设计转速下叶尖进口相对马赫数为 1.5, 单级压比 2.0, 负荷系数为 0.36, 代表了典型的高负荷跨声风扇的设计特点。本文所采用的 Stage 37 的叶片几何数据和实验测量结果源自公开文献 [28], 以无量纲转速为 1.0 峰值效率工况的流场为基准对通流程序进行标定, 被标定的模型包括设计工况的最小损失攻角模型、落后角模型、激波损失、型面损失模型和堵塞模型。为了让非设计工况的预测更准确, 基于近失速和堵塞工况的实验结果, 给定了遵循指数变化规律的附加落后角、激波损失

和叶型损失修正项。图 14 给出了 NASA Stage 37 的通流计算网格,沿流向共设置了 36 个计算站,其中转静子叶片通道中各 7 个计算站,沿展向采用 31 条流线。

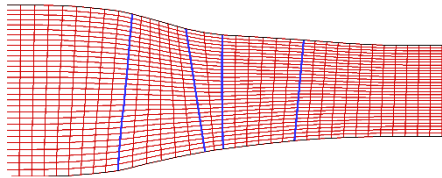


图 14 NASA Stage 37 的通流计算网格

Fig. 14 Throughflow calculation mesh for NASA Stage 37

图 15 给出了 NASA Stage 37 在无量纲转速 n 为 0.7~1.0 下的级特性,图中同时给出了无量纲转速为 1.0 的 CFD 计算结果。可以看到,标定后的通流程序(VICT)能够对级压比和效率给出与实验(Exp.)和计算(CFD)较为一致的预测,风扇特性在各转速下与实验结果吻合良好,表明通流程序对于压缩系统的低压端部件特性具有较高的计算精度。

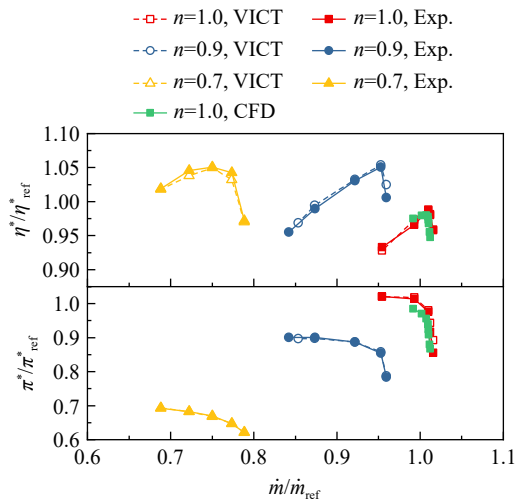


图 15 NASA Stage 37 在无量纲转速为 0.7~1.0 下的特性

Fig. 15 Performance map for NASA Stage 37 at 0.7—1.0 dimensionless rotational speed

2.2.2 高压端部件的校验

基于一个 5 级高压压气机的 CFD 结果对通流程序在压缩系统高压端部件的计算可靠性进行校验。压气机设计点进口叶尖相对马赫数为 1.16,第 1 级转子基于叶尖切线速度的负荷系数为 0.33,其他各级转子的负荷系数均在 0.35~0.40 之间。通流程序的标定仅在 $n=1.0$ 的设计点展开,被标定参数主要包括:环壁堵塞系数、等效扩散因子的经验系数、落后角的三维修正项、堵塞攻角的

经验系数和最小损失攻角的修正项,型面损失的变化指数等。非设计点和非设计转速的计算没有做特殊标定。考虑到高压压气机中流动的径向掺混效应增强,在计算中相应地增大掺混模型的掺混系数。5 级压气机的通流计算网格如图 16 所示,沿流向共设置 93 个计算站,其中各排叶片通道中均为 7 个计算站,沿展向采用了 31 条流线。

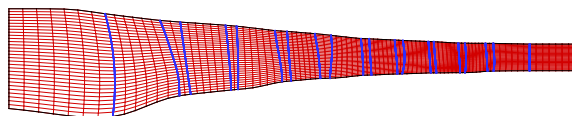


图 16 5 级压气机的通流计算网格

Fig. 16 Throughflow calculation mesh for the five-stage compressor

通流程序计算的 5 级压气机的总性能与 CFD 结果的对比如图 17 所示,可以看出在各转速下,通流程序计算得到的压气机特性无论是量值上还是趋势上均与 CFD 的计算结果吻合得较好。在 $n=0.9$ 近失速工况,通流程序计算得到的失速压比略高于 CFD 的计算结果,原因在于通流程序对角落流动分离所导致的落后角增大预测不足。总体而言,本文所发展的通流程序能够较好地预测该 5 级压气机常用转速下的总性能。

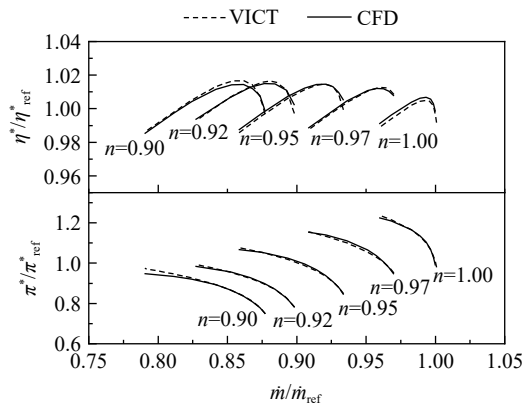


图 17 某 5 级压气机的特性

Fig. 17 Performance map for the five-stage compressor

2.3 基于通流程序的压缩系统部件匹配关系

本节将基于一体化通流程序分析各部件之间的匹配规律,探索部件约束下压缩系统的匹配工作范围。

2.3.1 部件的匹配可行域

参考图 1 的双外涵压缩系统,首先考虑风扇与 CDFS 的匹配。当风扇的工作点确定时,CDFS 的进口条件保持不变,此时如果选定了 CDFS 进

口导叶的开度与物理转速, 则其折合转速恒定, CDFS 的匹配工作点只能在一条固定的等转速特性线上移动。此时, 在 CDFS 失速裕度 (SM, 量符号记为 M_s), 本文中暂拟综合失速裕度为 5%~35% 的制约下, 其折合流量范围唯一确定, 相应的物理流量调节范围唯一可解。由于风扇与 CDFS 的物理流量直接决定了压缩系统的第二外涵道比, 因此在上述约束条件下, 压缩系统第二外涵道比 B_2 的可调范围唯一确定, 其极大值受 CDFS 失速边界的制约, 极小值则受制于 CDFS 的堵塞边界。

再考虑 CDFS 与高压压气机的匹配, 此时假设风扇与 CDFS 的匹配状态均保持不变。由于高压压气机与 CDFS 同轴, 两者的物理转速相同。由于高压压气机的进口条件不变 (风扇与 CDFS 的工作点不变), 因此其折合转速唯一确定。那么, 在当前的约束条件下, 高压压气机的匹配工作点只能在一条固定的等转速特性线上移动, 其流量调节范围受自身工作裕度的影响。考虑到压缩系统的第一外涵道比直接取决于 CDFS 与高压压气机的物理流量。因此, 在上述约束条件下, 压缩系统第一外涵道比的可调范围唯一确定, 其中 B_1 的极大值由高压压气机的失速边界决定, 极小值则受制于高压压气机的堵塞边界。

根据上述分析, 双外涵变循环发动机压缩系统涵道比的调节范围受部件稳定工作范围的影响, 以部件匹配裕度的上、下限为边界, 可以得到压缩系统的部件匹配可行域, 如图 18 所示, 图中取风扇无量纲转速 $n_{\text{fan,cor}}=1.0$, 风扇裕度 $M_{s,\text{fan}}=10\%$, CDFS 无量纲转速 $n_{\text{CDFS,cor}}=0.9$, CDFS 进口导叶开

度 $\alpha_{\text{VIGV}}=0^\circ$ 的状态为例进行说明。图 18 中, 经线表示 CDFS 的裕度等值线, 与第二外涵道比的等值线重合, 使 B_2 取得极大值和极小值的边界分别表示 CDFS 的近失速和近堵塞边界; 纬线为高压压气机的裕度等值线, B_1 的上、下边界分别表示高压压气机的近失速与近堵塞边界。当 CDFS 通流能力最大 (堵塞)、高压压气机通流能力最小 (失速) 时, 压缩系统的第一外涵道比达到最大; 而当 CDFS 的通流能力最小 (失速)、高压压气机通流能力最大 (堵塞) 时, 压缩系统的第一外涵道比最小。为了保证压缩系统的高效稳定工作, 将部件的匹配状态选择在可行域的左下方为宜。实际压缩系统中, B_1 与 B_2 的调节范围与对应转速下部件的流量特性有关, 由压气机的设计所决定。

2.3.2 控制参数调节对部件可行域的影响

上文中得到的压缩系统的部件匹配可行域是在风扇工作点不变、高/低压轴转速比恒定的条件下得到的, 本节将讨论控制参数调节对压缩系统部件匹配可行域的影响。

首先研究风扇匹配状态变化对部件匹配可行域的影响, 本文采用失速裕度衡量风扇的匹配状态。图 19 给出了不同风扇裕度下压缩系统的匹配工作可行域的变化情况。研究表明, 随着风扇裕度下降, 其工作点向失速边界移动, 进入发动机的总物理流量具有减小的趋势, 同时 CDFS 的进口总温/总压提高; 在 CDFS 折合转速与裕度不变的条件下, 其物理流量将会增大。以上两种效应均具有促使压缩系统第二外涵道比降低的作用, 因此压缩系统的匹配工作范围整体上向左平移。由于上述调节过程没有改变 CDFS 与高压压气机的特性, 两者的匹配关系不变, 压缩系统第一外涵道比的调节范围不变。

通过改变高压轴转速, 研究发动高、低压轴转速比调节对压缩系统部件可行域的影响, 图 20 给出了高压轴转速调节过程中压缩系统的匹配工作范围的变化情况。研究表明, 随着 CDFS 折合转速的降低, 压缩系统的部件匹配可行域有向右上方移动的趋势, 可实现的第二外涵道比增加。其原因主要是, 低转速下 CDFS 的通流能力下降, 工作流量减小, 从而导致更多的流量进入第二外涵道, 促使第二外涵道比增加。压缩系统的第一外涵道比取决于 CDFS 与高压压气机的匹配, 而高压压气机的折合转速取决于 CDFS 的气动性能, 满足 $n_{\text{HPC,cor}} = n_{\text{CDFS,cor}} / \sqrt{\tau_{\text{CDFS}}}$ 。因此, 对于

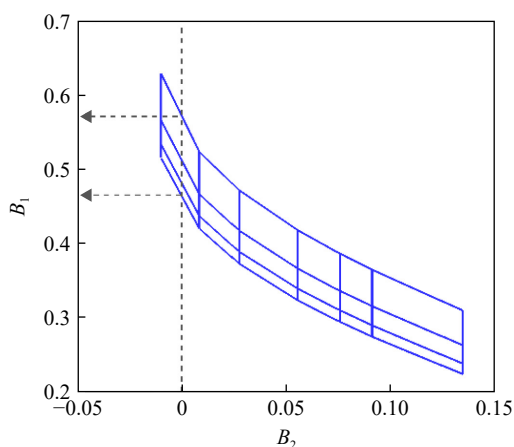


图 18 压缩系统的部件匹配可行域

($n_{\text{fan,cor}}=1.0$, $M_{s,\text{fan}}=10\%$, $n_{\text{CDFS,cor}}=0.9$, $\alpha_{\text{VIGV}}=0^\circ$)

Fig. 18 Component operation zone of the compression system

($n_{\text{fan,cor}}=1.0$, $M_{s,\text{fan}}=10\%$, $n_{\text{CDFS,cor}}=0.9$, $\alpha_{\text{VIGV}}=0^\circ$)

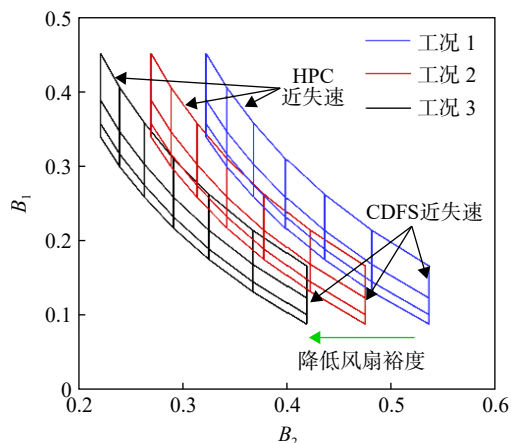


图 19 不同风扇裕度方案压缩系统的部件匹配可行域

Fig. 19 Component operation zone of the compression system with different fan stall margins

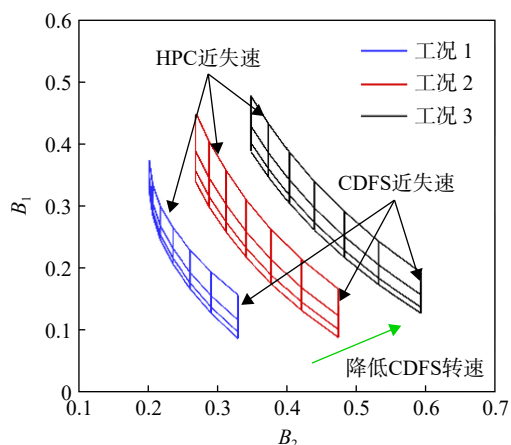


图 20 不同 CDFS 转速下压缩系统的部件匹配可行域

Fig. 20 Component operation zone of the compression system with different CDFS rotating speeds

$n_{\text{CDFS, cor}}$ 不同的工况, CDFS 的等裕度点对应的高压压气机折合转速不同, 第一外涵道比的调节范围由 CDFS 和高压压气机的流量特性共同决定。对于当前的验算条件, 第一外涵道比的取值随着 CDFS 折合转速的降低略有增大。

应当指出, 本节给出的压缩系统的部件匹配可行域是基于双外涵工作模式推导得到的, 此时压缩系统的模式选择阀门打开, $B_2 > 0$ 。在单外涵模式下, 第二外涵道比恒为零, 压缩系统的匹配工作范围在呈现为匹配工作区与 $B_2 = 0$ 工况的交线。因此, 在部件层面, 单外涵模式可以视作双外涵模式的一种特殊情况, 此时压缩系统的部件匹配可行域由一个二维域退化成一个直线。

2.4 考虑涵道影响的多连通压缩系统气动特征分析

根据前文的论述, 变循环压缩系统的匹配工作范围不但与部件的匹配关系有关, 还会受涵道

的约束。考虑到通流程序仅能够快速预测不出现 MSV 回流情况下各部件的匹配工作特征, 而无法充分考虑涵道和调节机构的约束, 因此本节将提出变循环压缩系统的一体化变维度分析方法, 在部件匹配分析的基础之上通过基于控制体的零维分析方法考虑涵道和调节机构的约束, 从而实现对真实多连通压缩系统复杂匹配关系的全面分析。

2.4.1 考虑涵道影响的变循环压缩系统一体化变维度分析方法

为了确定影响涵道气动性能的关键参数, 快速评估其匹配特性, 作者在前期研究中发展了基于控制体方法的变循环涵道零维分析模型。该模型能够根据涵道的几何调节状态及进、出口气动参数快速预测涵道典型截面的流量、压力和损失等参数。基于真实涵道的流动数值数据库对 0 维模型进行了标定, 从而确保了模型对于特定涵道几何的计算准确性^[17]。

如图 21 所示, 为了分析压缩部件与涵道耦合匹配工作关系, 本文建立了变循环压缩系统的变维度分析模型, 该模型将通流程序与涵道程序相结合, 在涵道与压缩部件交界面处进行总温、总压边界条件的传递, 并保证流量守恒, 从而实现涵道与部件匹配状态的快速计算与评估。

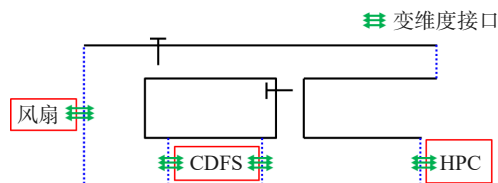


图 21 变循环压缩系统的变维度分析模型

Fig. 21 Variable-dimensional analysis method for variable cycle compression system

2.4.2 涵道和部件特性共同约束情况下的多连通压缩系统匹配机制探索

本节将从单外涵模式出发, 利用变维度分析方法对压缩系统涵道与部件的匹配关系进行讨论。参考图 18, 单外涵模式对应着部件可行域中 $B_2 = 0$ 的状态, 由于第二外涵道关闭, 来自风扇的流量悉数进入下游的 CDFS, CDFS 的工作点唯一确定。对于高压压气机, 其进口条件由上游风扇与 CDFS 的工作状态确定, 且物理转速与 CDFS 相等, 因此其工作点只能在一条固定的等转速特性线上移动, 此时高压压气机失速裕度的上、下限分别决定了压缩系统涵道比的最小值和最大值。

在涵道层面, 当风扇与 CDFS 的匹配点确定时, 压缩系统第一外涵道流体的总温与总压被唯一确定, 此时一旦 FVABI 的开度固定, 涵道物理流量的调节范围将受限于涵道的几何流通能力及总外涵道出口所能提供的匹配压力。考虑到本文主要关注压缩系统, 而总外涵道出口背压的取值需要通过发动机总体匹配分析获得, 因此暂不对 p_{out} 进行限制, 此时涵道比的极小值为 0, 极大值等于第一外涵道出口马赫数等于 1 时的涵道比。图 22 给出了压缩系统可实现的最大涵道比随 FVABI 开度的变化规律, 可以看出, 涵道比的极大值随着 FVABI 开度的提高而增大, 该部分涵道比的增量直接来源于第一外涵道流通面积的增加。

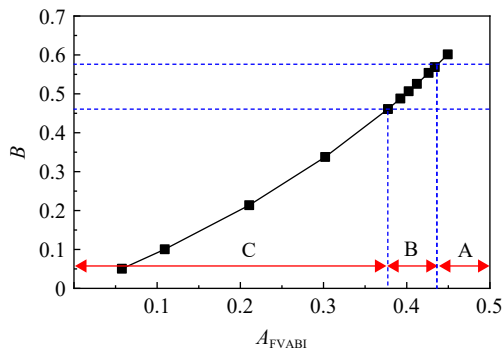


图 22 单外涵模式不同 FVABI 开度方案的最大涵道比

Fig. 22 The maximum bypass ratio for different FVABI opening schemes for the single bypass mode

通过上文的分析不难看出, 涵道自身可达到的极限涵道比是限制压缩系统调节范围的主要因素之一。为了综合考虑涵道与部件对压缩系统匹配工作范围的影响, 将图 18 中部件层面第一外涵道比的上、下边界绘制在图 22 中, 此时极限涵道比的变化曲线被划分为 3 个区域: 在 A 区, FVABI 的开度较大, 涵道所能达到的最大涵道比大于部件约束下的压缩系统最高涵道比, 因此涵道对于压缩系统不构成限制, 制约压缩系统工作范围的主要是高压压气机的稳定裕度; 在 B 区, 由于 FVABI 的开度有所减小, 涵道系统所能达到的最大涵道比低于部件约束下的最大涵道比, 但高于部件约束下的最小涵道比, 此时 FVABI 出口的最大流通能力取代高压压气机的失速边界, 成为限制压缩系统的最大涵道比的条件; 对于 C 区, 由于 FVABI 开度过小, 涵道自身所能达到的最大涵道比仍小于部件层面涵道比的下限, 因此压缩系统在此区域内无法匹配。

根据以上分析, 在单外涵模式下, 当风扇与

CDFS 的工作点确定时, 决定压缩系统可用工作范围的因素主要是高压压气机的裕度以及 FVABI 的开度。将不同 FVABI 开度下压缩系统涵道比的可调范围绘制出来, 即可得到考虑涵道影响的压缩系统综合匹配可行域, 如图 23 所示。可以看出, 当前匹配指标下压缩系统的可用工作范围亦分为 A、B 两个区域, 两者分别与图 22 中相应的区域对应。

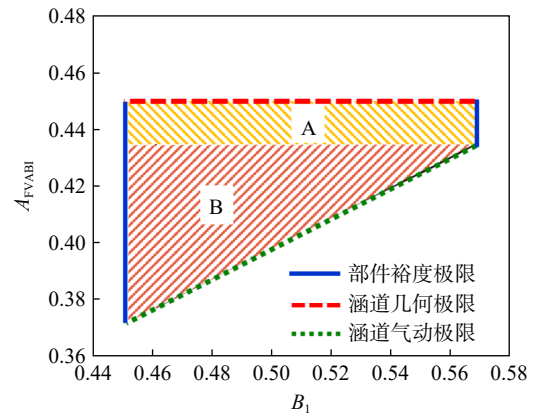


图 23 单外涵模式下压缩系统的综合匹配可行域

Fig. 23 Comprehensive operation zone of the compression system for the single bypass mode

当从单外涵模式转换到双外涵模式过程中, 转换路径不合适, 或者各部件以及调节机构设计参数不合理, 都有可能会导致在模式转换过程中出现显著的模式选择阀倒流流动, 造成压缩系统的性能突然下降。为了考虑倒流的边界对压缩系统匹配的影响, 对可行域中的各匹配点的倒流裕度进行计算, 结果如图 24 所示, 图中的倒流裕度 (RM, 量符号记为 M_r) 为作者前期研究中提出的

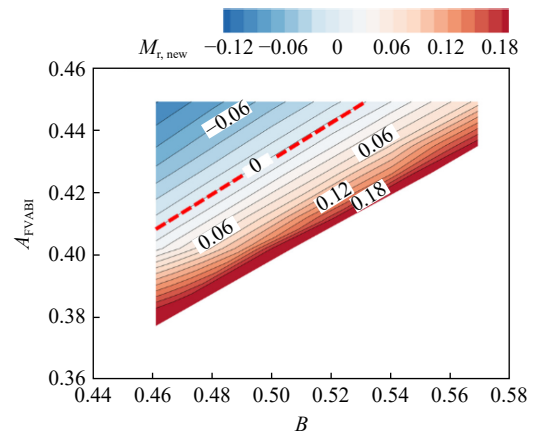


图 24 匹配可行域内倒流裕度的分布

Fig. 24 Distribution of recirculation margin in the operation zone

改进的倒流裕度(量符号记为 $M_{r, \text{new}}$)^[29]。对于倒流裕度小于0的区域, 直接打开MSV将导致第二外涵道倒流。因此, 为了避免倒流的发生, 模式转换前应将压缩系统的匹配状态调整至倒流裕度大于0的位置。在当前的匹配条件下, 倒流区占单外涵可行域的近1/3, 可见涵道倒流边界对变循环压缩系统的匹配与调节存在重要限制。

需要注意的是, 本文给出的压缩系统匹配工作可行域只是基于压缩系统的单外涵模式, 在特定的风扇、CDFS匹配工作状态推导得到的, 对于不同的部件匹配点, 可行域的形状与范围可能发生变化, 双外涵模式下则会表现出更为复杂的匹配规律, 此处限于篇幅不再展开。本文提出的部件-涵道一体化变维度分析方法对于各种变循环压缩系统的匹配机理分析具有普适性。

3 结 论

本文基于双外涵变循环发动机, 开展了变循环压缩系统多连通特征、部件与涵道的匹配工作机制研究, 提出了变循环发动机压缩系统的一体化变维度分析方法, 主要结论如下:

1) 变循环发动机的压缩系统不仅包含常规的各压缩部件及其主流道, 同时还包含复杂涵道及其调节机构, 各压缩部件与涵道及调节机构之间具有强耦合工作特征, 在分析压缩系统的匹配规律时须基于一体化模型全面考虑压缩系统综合气动性能的变化。

2) 高效的外涵道流动是发挥变循环发动机性能优势的关键, 性能优良的变循环发动机需要对涵道流路进行细致的设计, 根据部件与涵道的匹配关系对涵道的内部流动予以精心组织。

3) 涵道几何的调节件不仅会改变涵道的流动状态的改变, 还伴随着压缩部件气动性能的偏移。涵道的倒流边界对压缩系统的工作范围存在限制, 在单外涵模式下直接打开模式选择阀门可能会导致第二外涵道倒流, 部件匹配点偏离设计状态, 因此模式转换过程需要符合各涵道及调节机构之间的气动协调匹配。

4) 变循环压缩系统的一体化通流分析方法在压缩系统的风扇和高压压气机均具有较高的计算精度, 能够在二维层面上实现压缩系统流场的一体化计算, 满足变循环压缩系统部件匹配关系快速分析的需求。

5) 基于一体化通流分析程序研究了变循环

压缩系统部件的匹配关系, 给出了部件裕度约束下的部件匹配可行域, 分析了压缩系统调节过程中匹配可行域的变化情况, 为压缩系统部件匹配工作点的选取提供了依据。

6) 提出了变循环发动机压缩系统的一体化变维度分析方法, 能够实现部件-涵道耦合匹配关系的一体化研究, 该方法可用于各种多连通域的变循环压缩系统分析; 给出了单外涵模式下, 部件与涵道共同约束下的压缩系统综合匹配可行域, 分析了涵道倒流边界对压缩系统模式转换的影响, 为变循环压缩系统的匹配设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] JOHNSON J E. Variable cycle engine developments at General Electric-1955-1995[C]//Developments in high-speed vehicle propulsion systems. Reston, US: AIAA, 1996: 105-158.
- [2] General Electric. GE successfully concludes phase 1 testing on second XA100 adaptive cycle engine[EB/OL]. [2021-12-15]. <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-successfully-concludes-phase-1-testing-on-second-xa100-adaptive-cycle-engine>.
- [3] BERTON J J, HALLER W J, SENICK P F, et al. A comparative propulsion system analysis for the high-speed civil transport[R]. NASA/TM-2005-213414, 2005.
- [4] GIFFIN, R G, JOHNSON J E. Gas turbine engine with outer fans: EP2333238A2[P]. 2011-06-15.
- [5] SIMMONS R J. Design and control of a variable geometry turbofan with and independently modulated third stream[D]. Columbus, US: The Ohio State University, 2009.
- [6] 史文斌, 王咏梅, 昌皓. 自适应发动机及压缩系统构型简析[J]. 航空动力, 2020(2): 57-60.
SHI Wenbin, WANG Yongmei, CHANG Hao. Analysis of adaptive cycle engine and compression system configuration[J]. Aerospace Power, 2020(2): 57-60. (in Chinese)
- [7] GIFFIN R G, JOHNSON J E. FLADE gas turbine engine with counter-rotatable fans: US7246484B2[P]. 2007-07-24.
- [8] FRENCH M, ALLEN C. NASA VCE test bed engine aerodynamic performance characteristics and test results[R]. Spings, Colorado, US: the 17th Joint Propulsion Conference, 1981.
- [9] CONRAD D W, GUY K F. Individual bypass injector valves for a double bypass variable cycle turbofan engine: US4175384[P]. 1979-11-27.
- [10] BACHELDER K A, WELTY D J. Methods and apparatus for supporting variable bypass valve systems: US6742324B2[P]. 2004-06-01.
- [11] 陈雷, 潘若痴, 杨琳, 等. 变循环发动机模式转换对压缩部件的影响[J]. 航空发动机, 2021, 47(2): 22-27.
CHEN Lei, PAN Ruochi, YANG Lin, et al. Influence of variable cycle engine mode transition on compression components[J]. Aero-engine, 2021, 47(2): 22-27. (in Chinese)
- [12] XU Zhewen, LI Ming, TANG Hailong, et al. A multi-fidelity simulation method research on front variable area bypass injector of an adaptive cycle engine[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(4): 202-219.
- [13] SONG Fu, ZHOU Li, WANG Zhanxue, et al. Integration of high-fi-

- delity model of forward variable area bypass injector into zero-dimensional variable cycle engine model[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(8): 1-15.
- [14] ZHANG Binglong, LIU He, ZHOU Jianhua, et al. Experimental research on the performance of the forward variable area bypass injector for variable cycle engines[EB/OL]. [2021-12-04]. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/tjeng-2020-0021/html>.
- [15] 刘佳鑫, 王志强, 严伟, 等. 单/双涵道模式转换动态过程的数值研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(8): 1699-1708.
LIU Jiaxin, WANG Zhiqiang, YAN Wei, et al. Numerical simulation of transition between single and double bypass mode[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(8): 1699-1708. (in Chinese)
- [16] HANG Guoping, LI Chao, XIA Chen, 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.
- [17] WANG Ruoyu, LIU Baojie, YU Xianjun, et al. The exploration of bypass matching limitation and mechanisms in a double bypass engine compression system[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 119: 107225.1-107225.14.
- [18] DENNEY R K, TAI J C, KESTNER B K, et al. Variable cycle optimization for supersonic commercial applications[J]. *SAE transactions*, 2005, 114(1): 1354-1361.
- [19] TAI J, ROTH B, MAVRIS D. Development of an NPSS variable cycle engine model[R]. Indianapolis, US: International Society for Air Breathing Engines, 2005.
- [20] CHEN Haoying, ZHENG Qiangang, GAO Yuan, et al. Performance seeking control of minimum infrared characteristic on double bypass variable cycle engine[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 108: 106359.1-106359.12.
- [21] WANG Shaochang, WANG Jiqiang, JIANG Bo, et al. Research of variable cycle engine modeling technologies[R]. Xiamen, Fujian Chinese Intelligent Systems Conference, 2016.
- [22] JIA Linyuan, CHEN Yuchun, CHENG Ronghui, et al. Designing method of acceleration and deceleration control schedule for variable cycle engine[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(5): 27-38.
- [23] 王若玉. 考虑涵道影响的双外涵变循环发动机压缩系统匹配机理研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2021.
WANG Ruoyu. Investigations on the matching mechanism of a double bypass engine compression system in consideration of the bypass configuration[D]. Beijing: Beihang University, 2021. (in Chinese)
- [24] SUN Shijun, WANG Songtao, CHEN Shaowen, et al. The impact of various forward sweep angles on the performance of an ultra-high-load low-reaction transonic compressor rotor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 150: 953-966.
- [25] ZHANG Longxin, WANG Songtao, ZHU Wei. Application of end-wall contouring in a high-subsonic tandem cascade with endwall boundary layer suction[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 245-256.
- [26] MATVEEV V, GORIACHKIN E, VOLKOV A. Increase of gas turbine plant efficiency by optimizing operation of compressors [C]// Institute of Physics (IOP) Conference Series: Materials Science and Engineering. Samara, Russian Federation: IOP Publishing, 2018: 012030.1-012030.7.
- [27] LIU Baojie, JIA Shaofeng, YU Xianjun. An integrated through-flow method for the performance analysis of variable cycle compression systems[J]. *International Journal of Turbo and Jet-Engines*, 2021, 38(3): 245-261.
- [28] REID L, MOORE R D. Design and overall performance of four highly loaded, high speed inlet stages for an advanced high-pressure-ratio core compressor[R]. NASA-TP-1337, 1978.
- [29] 刘宝杰, 王若玉, 梁彩云, 等. 变循环压缩系统涵道流动计算模型及模式转换倒流判据研究[J]. *推进技术*, 2021, 42(9): 1976-1984.
LIU Baojie, WANG Ruoyu, LIANG Caiyun, et al. A CFD model for bypass flow in variable cycle engine compression systems and criterion to predict flow recirculation during mode transition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(9): 1976-1984. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)