

基于节流阀模型的变循环压缩系统模式转换过程数值模拟方法研究

王昊, 梁熙文, 马庆华, 王掩刚

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要:为了研究变循环发动机压缩系统模式转换过程中气动特性变化规律,基于节流阀理论,建立了能够描述不同开度下模式选择阀门节流特性的低阶模型。并将该模型以特征边界的形式应用于某双涵道变循环风扇的外涵道出口,建立了用于模式转换过程流场数值仿真的全三维/低阶混合计算模型。通过与全三维阀门建模的计算结果对比,验证了节流阀计算模型的精度和有效性,进一步将此方法用于该变循环风扇单-双涵道模式转换过程风扇性能变化预测及分析,得到以下结论:表征节流强度的节流阀系数只与阀门流通面积比有关,与阀门角度无关,因此该节流阀模型对于不同运动角度范围的模式选择阀门具有普适性;节流阀模型方法能够准确地预测模式转换过程中风扇整机及各级气动特性的变化趋势,与阀门三维建模方法相比,对风扇整机及各级压比预测误差不超过1.93%,效率误差不超过1.05%;在阀门关闭的过程中,第二级风扇性能变化更剧烈,第一级风扇性能在阀门开度较大时气动性能基本不变,开度较小时才出现明显变化,存在滞后性。

关键词:变循环发动机;模式转换过程;节流阀模型;数值仿真

中图分类号:V231.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2022)02-0306-10

变循环发动机(variable cycle engine, VCE)采用几何形状、尺寸和相对位置可变的部件,改变其热力循环参数(如空气流量、涵道比、增压比和涡轮前燃气温度等),使其在不同飞行条件下有优良的性能^[1-2]。变循环发动机综合了涡扇发动机在亚音区的低油耗优势,和涡喷发动机在超音区的高推进性能的优点。其中,双涵道变循环发动机(double bypass engine, DBE)作为VCE的典型代表,得到了较多关注和研究^[3]。

国外对于双外涵变循环发动机的设计以及变几何部件的优化实验上做出了大量工作^[4-5]。从20世纪70年代开始,在美国超声速巡航研究(supersonic cruise aircraft research, SCR)^[6]计划支持下,通用电气公司(GE)对变循环发动机进行了多代设计,提出了双涵道变循环发动机的概念,即GE21变循环发

动机。1976年美国空军针对双涵道变循环发动机压缩系统,在GE21发动机上运用模式选择阀门(mode selector valve, MSV)进行单-双涵道工作模式转换,并提出核心机驱动风扇级结构(core drive fan stage, CDFS)。1978年到1979年美国海军和NASA先后验证了前、后可变面积涵道引射器(variable area bypass injector, VABI)技术,并对模式转换过程的部件匹配方式进行了优化^[7]。20世纪末期,GE公司在GE21的基础上发展了F120发动机,它是世界上第一种经飞行验证的双外涵变循环发动机^[8]。近年来,国内对于变循环发动机的研究逐渐重视,主要针对双涵道变循环发动机整机的稳态、过渡态性能以及部件匹配上研究较为深入^[9-10]。

变循环发动机压缩系统较常规发动机压缩系统气动布局更加复杂,通过MSV和VABI等变几何部

收稿日期:2021-04-18

基金项目:国家科技重大专项(J2019-II-0020-0041)、国家自然科学基金(51906205)

及陕西省自然科学基金(2019-JQ-620)资助

作者简介:王昊(1986—),西北工业大学讲师,主要从事叶轮机械非定常流动测试及仿真研究。

通信作者:王掩刚(1976—),西北工业大学教授,主要从事高性能叶轮机械设计技术研究。e-mail:wyg704@nwpu.edu.cn

件的组合调节实现不同工作模式间的转换。在 VCE 模式转换过程中,部件间匹配关系大幅变化,气动耦合强,匹配难度大,调节规律确定困难。因此,充分认识 VCE 模式转换过程中压缩系统各部件的气动特性及流场变化规律,并对风扇/涵道间的流动进行合理组织是保证 VCE 压缩系统稳定运行的关键。在变循环压缩系统研究方面,韩佳等^[11]提出简化 CDFS 的几何模型,结合特征面马赫数对涵道流路进行优化,得到了双涵道在不同模式下的匹配与损失关系。张鑫等^[12-13]研究不同 CDFS 结构参数对其气动性能的影响,并对其转静子的匹配进行探索。针对模式转换过程中压缩系统气动性能的动态变化,刘佳鑫等^[14]对 MSV 采用动网格技术进行网格划分,模拟得到 MSV 开启和关闭 2 个过程下的流场特征和分流环附近气动参数变化的规律,并发现阀门开关速率对流场变化存在滞后性的影响。刘宝杰等^[15]以一体化通流计算程序为基础,得到基准匹配状态时第一外涵节流和第二外涵节流时的匹配关系以及各压缩部件的特性变化。进一步研究了 MSV 开启时,压缩系统受倒流影响时风扇、CDFS 和高压压气机的工作点变化规律,并对第二外涵道发生倒流的原因和影响因素进行了研究^[16]。目前,国内针对变循环压缩系统在不同工作模式下的气动特性变化和部件匹配规律的认识还有待进一步深入。

对于在 VCE 压缩系统模式转换过程的 CFD (computational fluid dynamics) 仿真,考虑到模式选择阀门、涵道引射器等部件几何结构和运动规律的复杂性,采用传统的针对运动对象的全三维建模方法(如动网格或嵌套网格技术)对于准确而高效地获得流场动态结果存在诸多困难。一方面,计算过程中复杂三维结构的网格生成耗费额外的时间成本和计算资源,另一方面动网格抑或嵌套网格技术易出现网格质量恶化和产生负体积等问题,降低计算的鲁棒性。因此,有必要发展更加高效稳健的变循环压缩系统模式转换过程三维流场动态仿真手段。

节流阀模型作为一种能够描述阀门节流特性的低阶数学模型,代替全三维建模方法对 MSV 和 VABI 进行建模,并与风扇及涵道系统三维模型相耦合,应用于模式转换动态仿真。节流阀模型最初由 Cumpsty^[17]提出,其通过节流阀系数将经过阀门气流的流量(或动压)与压降相关联,可以描述在给定节流条件(阀门开度)下阀门的压降-流量变化关系。

本文为了发展更加高效稳健的 VCE 压缩系统模式转换动态过程数值仿真方法,基于节流阀理论建立了模式选择阀门节流特性数学模型,并将该模型应用于某双涵道变循环风扇,与风扇全三维建模相耦合形成了全三维/低阶混合计算模型。通过与阀门全三维建模结果对比,验证了该节流阀计算模型的精度和有效性。进一步基于此方法对该变循环风扇单-双涵道模式转换过程气动特性变化进行了准稳态分析。

1 研究对象

双涵道变循环发动机压缩系统结构简图如图 1 所示,结构包括旋转部件:风扇、核心机驱动风扇级(CDFS)和高压压气机;可变几何部件:模式选择阀门(MSV)、涵道引射器(VABI);第一外涵与第二外涵组成的双涵道结构。

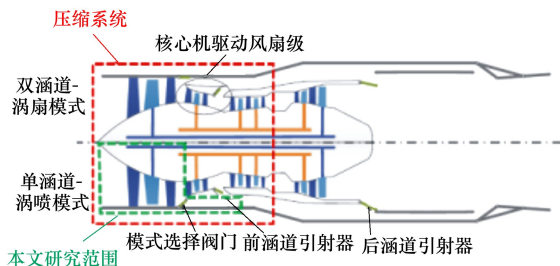


图1 变循环发动机压缩系统^[18]

模式选择阀门 MSV 是模式转换过程流量调节的关键部件,通过阀门的开关控制流入第二外涵道和核心机的流量。在模式选择阀门开关过程中,不同时刻阀门开度的变化导致阀门节流特性的改变,决定着涵道间的流量匹配关系。因此,可以利用节流阀理论,建立能够描述模式选择阀门节流特性的数学模型。在模式转换过程流场数值模拟中利用阀门节流特性的数学模型代替阀门全三维建模,能够提高计算的效率和鲁棒性。

2 节流阀模型建立

本部分采用节流阀理论对模式选择阀门的节流特性建立计算模型。节流阀模型描述了不同阀门开度或流量下,阀门节流过程的压降特性,如(1)式所示

$$p_1 = p_2 + \frac{1}{2}k\rho v^2 \quad (1)$$

式中： p_1 为阀门前静压； p_2 为阀门后静压； ρ 为阀门前气流密度； v 为阀门前气流速度； k 为节流阀系数，表征了节流强度的大小。该节流阀模型描述了阀门前后压差与阀门动压的线性关系。

2.1 阀门流场数值模拟

为了建立节流阀模型，需要获得模式选择阀门的节流特性。阀门开度定义为 $S = S_1/S_0$ ，其中 S_1 为阀门在流动方向上的打开面积， S_0 为阀门在流动方向上的总面积（见图2）。通过建立直管道模式选择阀门模型，并对该模型流场进行数值模拟，基于流场计算结果获得不同开度及不同流量下的阀门压降特性，进一步通过拟合可获得节流阀系数 k 与阀门开度 S 的关系。定义阀门与管壁之间的角度为阀门角度 α ，阀门全开时 α 等于 0° ，阀门全关时为阀门最大角度 α_{\max} 。考虑到在实际的变循环发动机中阀门的最大角度 α_{\max} 可能有不同的取值，为了保证节流阀模型的普适性，节流阀模型的建立考虑了3种不同阀门最大角度 $\alpha_{\max} = 15^\circ, 30^\circ$ 和 40° 。对于每一种阀门最大角度，分别考虑了阀门开度 S 为 0.72, 0.46, 0.34, 0.22, 0.10, 0.04 的6种情况。

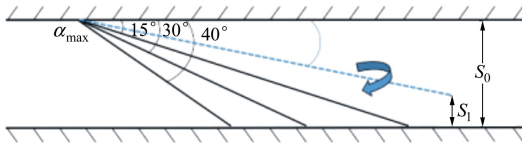


图2 直管道阀门模型示意图

直管道阀门计算模型采用 ICEM CFD 进行非结构网格划分，壁面附面层区域生成六棱柱网格，壁面第一层网格尺度保证 $y^+ < 1$ 。当阀门开度较小时，阀门喉部附近流场变化剧烈，此时对阀门喉部区域网格进行局部加密，总网格量约为 25 万。使用 ANSYS CFX 对阀门流场进行定常数值模拟，湍流模型选用 Spalart-Allmaras，采用一阶迎风格式进行差分，工质选用理想气体，进口给定总温总压，壁面为绝热、无滑移边界条件。通过改变出口背压获得任一阀门开度下不同流量工况的计算结果。

2.2 节流阀系数 k 标定

图3展示了阀门开度 $S = 0.47$ 时，不同阀门运动范围 α_{\max} 下阀门流场的压力云图及流线图。通过压力云图可以看出，在阀门前流场压力分布均匀，在经过阀片时，压力逐渐减小在喉部处三者压力数值

几乎一致。气流通过阀门之后相比阀门前压力降低，对于同一阀门开度，3种阀门最大角度下阀门前后压降几乎一致。通过流线图看出，气流在阀门喉部位置之前流动均匀，在阀门后形成一个较大的回流区，3种情况回流区尺度几乎一致。经过回流区后，流体得到充分发展，此时速度和压力分布较为均匀。

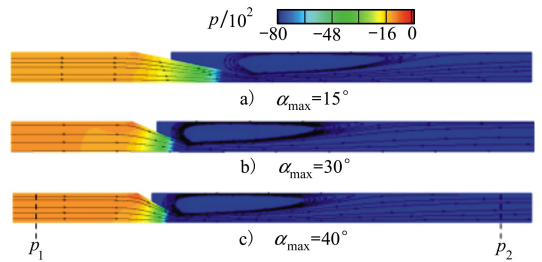


图3 阀门开度 $S = 0.47$ 时不同阀门运动范围 α_{\max} 的阀门流场(压力云图与流线图)

从阀门上游得到 p_1 和下游流动充分发展的截面得到 p_2 ，如图3所示。分别提取2个截面上的平均静压值，获得阀门的压降 Δp ；同时，在阀门上游截面提取截面平均密度和速度，计算得到动压。进而，可以获得不同阀门开度下阀门的节流特性——即压降与动压的关系曲线，如图4所示。

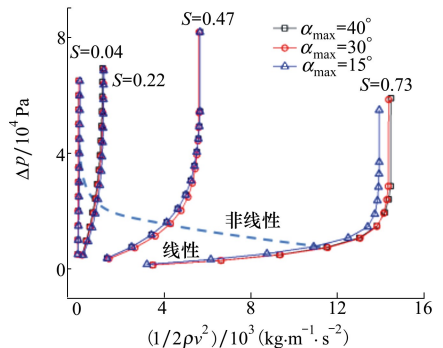


图4 不同运动范围 α_{\max} 及阀门开度 S 下模式选择阀门节流特性线

从图4中可以看出，在相同的阀门开度下，不同阀门运动范围情况下的压降-动压特性线几乎重合，因此阀门的节流特性只与阀门开度有关，而与阀门角度无关。另外，可以看出随着流量的增加，压差与动压首先呈线性关系。当流量达到某一临界值时，随着压降进一步提高，流量和动压不再继续增大，此时阀门喉部处于临界状态，流量达到最大值。

此后,阀门压降与动压呈非线性关系。经过计算验证可知,模式选择阀门在开闭过程中实际运行条件几乎均处于压降-动压线性关系的区域,因此可以用该节流阀模型对模式选择阀门的节流特性进行建模。

针对阀门压降-动压特性图上的线性区域,分别对不同阀门开度下的压降特性曲线进行线性拟合,所得到的斜率即为当前阀门开度下的节流阀系数,节流阀系数 k 与 6 个阀门开度的对应关系如表 1 所示。对上述 6 个离散特性点进行进一步的拟合(见图 5),获得节流阀系数 k 随阀门开度 S 的连续变化函数。

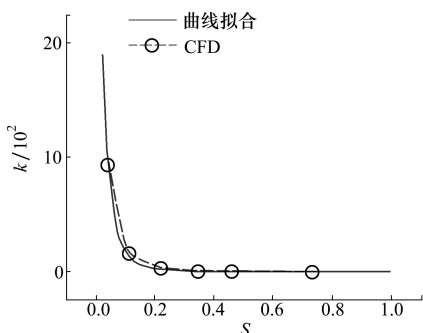


图 5 节流阀系数 k 随阀门开度 S 变化关系拟合

表 1 节流阀系数变化图

$S=S_1/S_0$	k
0.042 200 799	941.427
0.107 683 471	155.793
0.222 138 075	29.483
0.342 523 098	9.625
0.467 911 173	3.898
0.729 851 509	0.664

节流阀系数随阀门开度变化的函数表达式为

$$k = 3\,579e^{-35.28S} + 193.2e^{-8.703S} - 1.2S + 1.17 \quad (2)$$

将(2)式代入到节流阀模型表达式(1)中,即得到了能够描述不同阀门开度下阀门节流特性的数学模型。注意到阀门的节流特性只与阀门开度有关,而与阀门角度无关,因此该节流阀模型对于不同运动角度范围的模式选择阀门具有普适性。

3 数值方法

本文以某两级半风扇为研究对象,建立了包含中介机匣及双涵道结构的计算模型,如图 6 所示

(为了方便后文进行分析,选取 $P_1 \sim P_6$ 和 $Q_1 \sim Q_4$ 共计 10 个特征截面)。在该计算模型的基础上,进行了 3 组计算:①常规风扇结构计算:计算域出口取在 $B-B$ 截面,对风扇的常规特性进行计算;②基于 MSV 三维建模的模式转换过程计算:计算域出口取在 $C-C$ 截面,在 $B-B$ 截面的外涵道进口,建立 MSV 的三维模型,以风扇设计状态点为模式转换过程起始点,通过改变阀门的角度模拟 MSV 的关闭过程;③基于节流阀模型的模式转换过程计算:与②的区别为不对 MSV 进行三维建模,取而代之的是在外涵道进口给定节流阀模型的特征边界,通过改变节流阀系数模拟 MSV 的关闭过程。

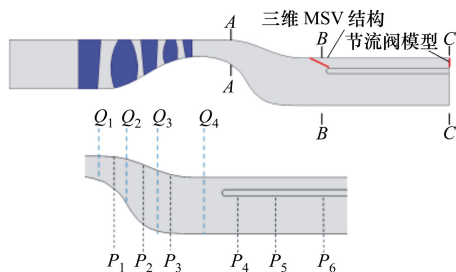


图 6 双涵道变循环风扇计算模型子午面

对 3 种计算模型均采用单通道计算方案。采用 NUMECA-Autogrid 5 对常规风扇结构和基于节流阀模型的计算模型进行结构化网格划分。对于基于阀门三维建模的计算模型,对包含 MSV、分流环及双涵道结构的计算域采用 ICEM 划分非结构化网格,风扇及中介机匣部分依然采用结构化网格。常规风扇结构计算域网格总数为 230 万;采用三维 MSV 结构的计算域(以下简称“三维 MSV 模型”)网格总数为 380 万;采用节流阀模型的计算域(以下简称“节流阀模型”)网格总数为 400 万。计算网格的部分细节如图 7 所示。

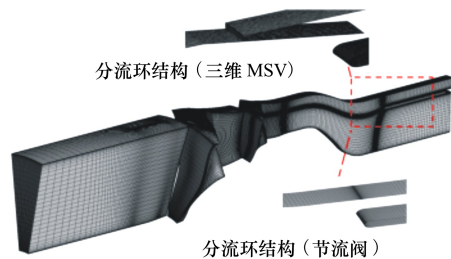


图 7 风扇部件网格图及模式选择阀局部细节图

3 种计算模型均采用 ANSYS CFX 作为求解器进行定常数值模拟,选择方程 Spalart-Allmaras 作为

湍流模型,采用一阶迎风格式进行差分,物理时间步长给定叶片通过周期的 1/10。进口边界条件给定总温和总压,壁面条件为绝热无滑移光滑壁面。常规风扇结构计算模型通过在出口边界给定静压进行节流。对于模式转换过程的模拟,三维 MSV 结构计算模型和节流阀计算模型均先在阀门全开条件下,通过给定外涵出口和内涵出口的背压得到风扇的设计点工况。然后,分别通过三维 MSV 模型和节流阀模型对外涵道进行节流,获得模式转换过程的流场变化结果,模式转换过程终点为阀门全关状态。

4 计算结果与分析

为了验证基于节流阀模型的变循环压缩系统模式转换过程计算模型的准确性,以 MSV 三维建模计算得到模式转换过程气动特性为基准,从变阀门开度、变涵道比和分流环上下游流场径向分布 3 个角度对基于节流阀模型得到的计算结果进行误差分析。在此基础上,基于节流阀模型的计算结果对风扇模式转换过程气动特性变化规律进行准稳态分析。

4.1 变阀门开度验证

节流阀模型通过建立节流阀系数 k 与阀门开度 S 的对应关系,描述了不同开度下的阀门节流特性。因此在相等阀门开度的条件下,基于节流阀模型的计算结果能否较准确地预测模式转换过程风扇气动性能变化规律是验证该计算模型准确性的要素之一。下文图中所示 π^* , m^* 均为无量纲特征参数,绝对误差表示为 Δ ,平均绝对误差表示为 $\bar{\Delta}$,相对误差表示为 δ ,平均相对误差表示为 $\bar{\delta}$ 。

相同阀门开度下风扇部件的总体性能如图 8 所示。在预测总体压比性能时,随着阀门逐渐关闭误差增大,阀门接近关死时最大绝对误差和最大相对误差分别为 0.071% 和 1.93%,在整个模式转换过程范围内,平均绝对误差不超过 0.039,平均相对误差不超过 1.09%。预测风扇部件整体效率特性时,节流阀模型的计算误差在阀门关闭过程中变化很小,在整个模式转换过程范围内,在阀门开度为 0.32 时有最大绝对误差为 0.007 9 和相对误差为 0.94%,整个模式转换过程中平均绝对误差约为 0.004 7,平均相对误差为 0.56%。

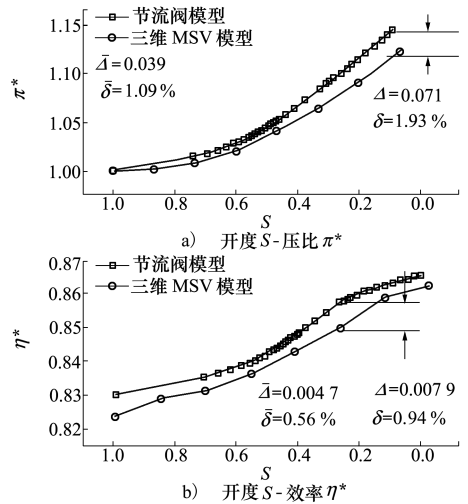


图 8 模式转换过程风扇整机特性随阀门开度变化

为进一步验证节流阀模型对于各级转子部件性能预测的可靠性,选取两级转子压比和效率特性进行对比,如图 9 所示。从压比特性图中可以看出,两级转子压比特性的最大相对误差为 1.66% 和 2.37%,平均相对误差为 0.75% 和 0.65%;在效率特性中最大相对误差为 0.75% 和 1.33%,平均相对误差为 0.25% 和 0.62%。

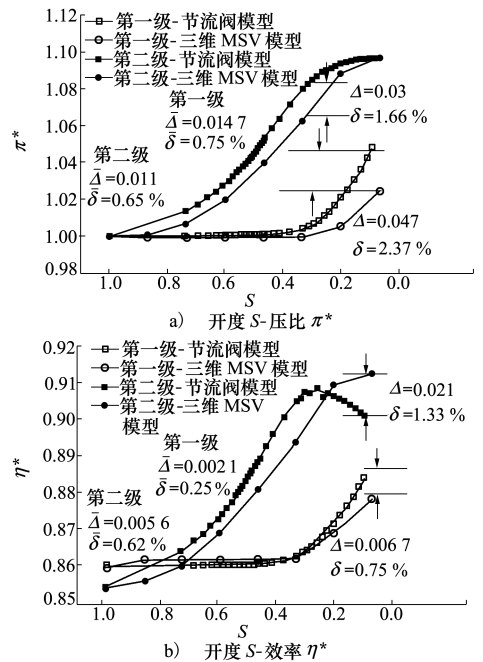


图 9 模式转换过程风扇各级特性随阀门开度变化

4.2 变涵道比验证

对于变循环压缩系统,涵道比是表征压缩系统

运行工作状态及部件匹配的关键参数,因此还需要利用 MSV 三维建模计算结果,在相同的涵道比条件下,对基于节流阀模型的计算结果进行验证。

相同涵道比下的风扇压比和效率特性曲线如图 10 所示。预测总体压比性能时,随着阀门逐渐关闭误差逐渐增大,在阀门接近关死时压比绝对误差最大,为 0.05,此时相对误差为 1.36%,在整个模式转换过程中,平均绝对误差不超过 0.022,平均相对误差不超过 0.616%。预测风扇部件效率特性时,最大绝对误差为 0.006,此时相对误差为 0.73%,平均绝对误差约为 0.003 6,平均相对误差为 0.425%,在涵道比相同时 2 种总体性能计算方法有相同的变化趋势。

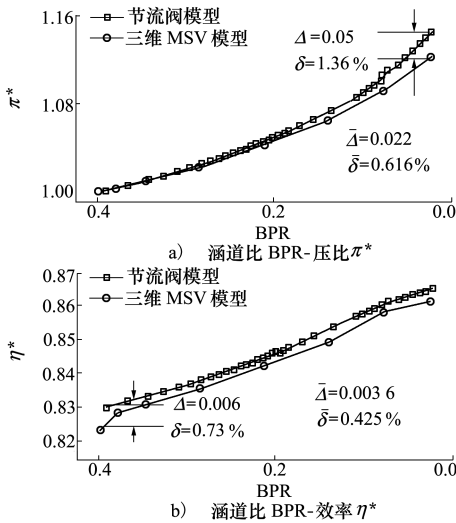


图 10 模式转换过程风扇整机特性随涵道比变化

各级转子在相同涵道比时的压比和效率特性如图 11 所示。从图中可以看出两级转子压比特性的最大相对误差为 0.72% 和 1.86%,平均相对误差为 0.502% 和 0.26%;在效率特性图中最大相对误差为 0.399% 和 1.05%,平均相对误差为 0.19% 和 0.386%。

基于以上变阀门开度对比和变涵道比对比结果综合分析得出:基于节流阀模型计算方法能够较准确地预测变循环压缩系统模式转换过程风扇部件气动特性变化规律,并且在等涵道比条件下的预测结果有更小的误差,使得节流阀模型在用于变循环压缩系统部件匹配分析时有更强的适用性。关于该计算模型误差产生的原因将在下文中具体分析。

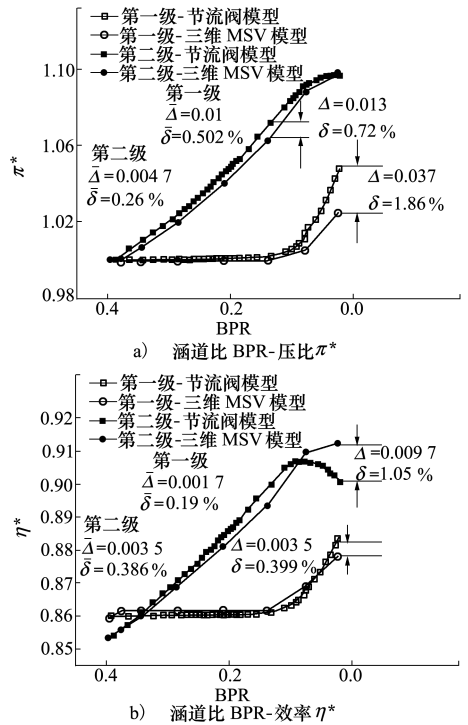


图 11 模式转换过程风扇各级特性随涵道比变化

4.3 分流环附近流场验证

为了验证基于节流阀模型的计算结果对分流环附近流动匹配和分流环上下游流场分布的预测精度,选取如图 6 所示 $P_1 \sim P_6$ 共 6 个轴向截面(3 个位于分流环上游中介机匣部分,3 个位于分流环下游内涵道部分)。在不同的涵道比下得到 6 个截面的马赫数径向分布,对节流阀模型和三维 MSV 建模计算结果进行对比分析。

如图 12 所示,对于分流环上游 3 个轴向截面位置的马赫数径向分布,节流阀模型和三维 MSV 结构的计算结果在不同的涵道比下都吻合较好。而对于分流环下游 3 个轴向截面位置的马赫数径向分布,在较大涵道比(0.34)下节流阀模型和三维 MSV 模型计算结果吻合较好。当涵道比很小(0.02)即阀门接近关死时,节流阀模型计算得到的内涵马赫数在顶部区域显著低于三维 MSV 模型的计算结果。

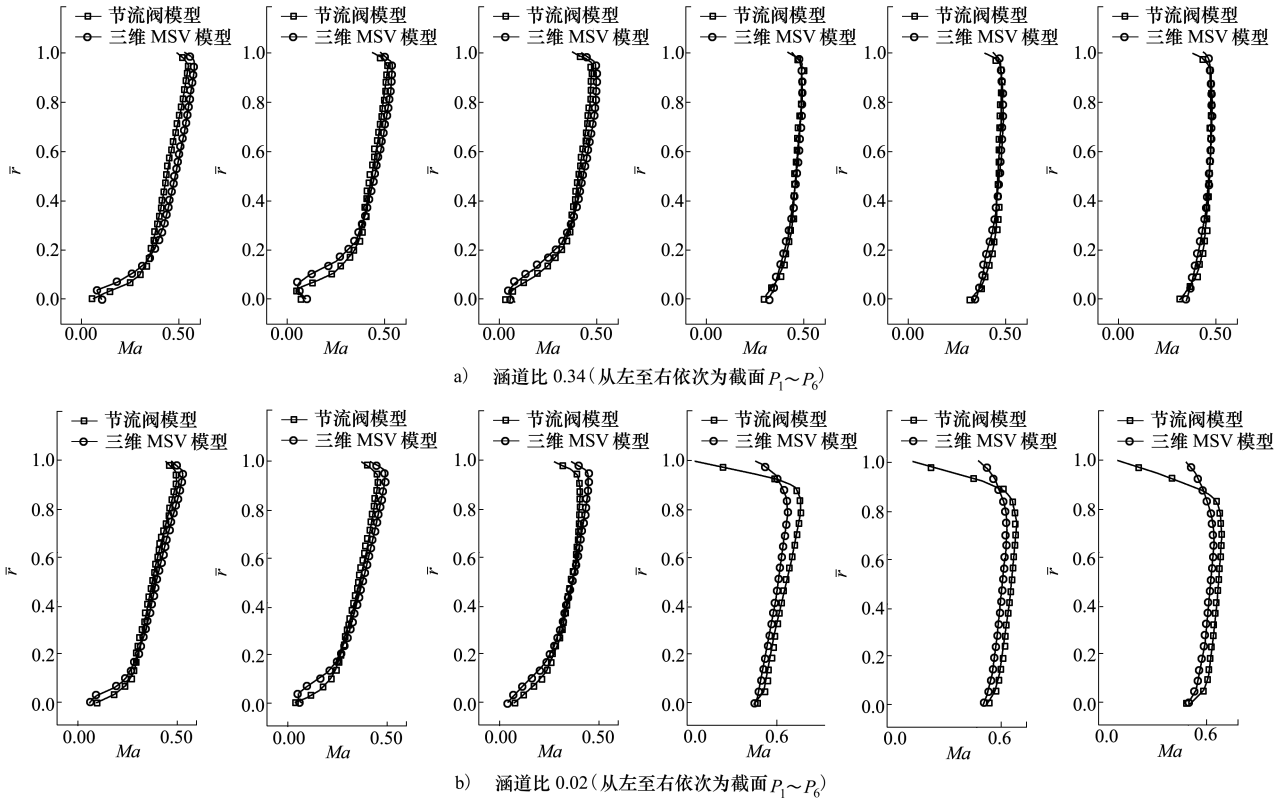


图 12 分流环上下游不同轴向位置马赫数径向分布

图 13 给出了部分涵道比下中介机匣及双涵道部分分子午面的流线和马赫数分布。可以看出,在较大涵道比下,整体上节流阀模型与三维 MSV 结构的计算结果对中介机匣及分流环附近的流场分布预测基本一致,在 $B-B$ 截面存在 MSV 关闭引起的局部节流作用会与分流环的分流作用的相互耦合,共同影响分流环附近流场。在阀门接近全关即极小涵道比(0.02)时,基于节流阀模型的计算结果高估了流体绕过分流环前缘后形成的分离区,造成了在内涵道靠近分流环顶部的马赫数低于三维 MSV 结构计算结果。

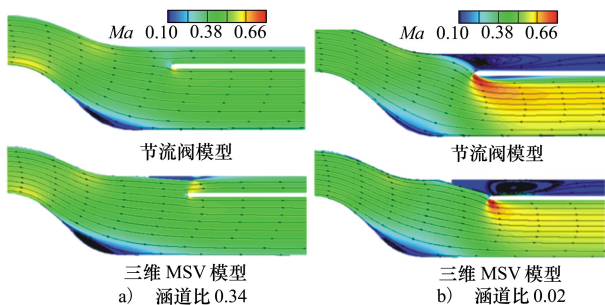


图 13 不同涵道比下中介机匣及双涵道部分分子午面流线及马赫数分布

综合 3 种验证结果分析,误差产生的可能原因主要有两方面:①为了保证数值计算的稳定性,节流阀模型出口边界设置于外涵道经过一段等截面稳定段下游的位置。由于节流阀压降特征出口边界位置($C-C$ 截面)与真实 MSV 部件位置($B-B$ 截面)存在差异,真实 MSV 在 $B-B$ 截面节流作用会与分流环的分流作用相互耦合,共同影响分流环和 MSV 附近的局部流场。2 个部件共同作用时的等效节流特性可能与 MSV 在 $C-C$ 截面单独作用时的节流特性存在一定差异,这是导致相同开度下节流阀模型与三维 MSV 建模预测结果存在偏差的原因之一。尤其是在阀门关闭到接近关死状态时,节流程度和分流环前缘攻角更大,节流效应和分流效应耦合作用更强,可能会导致误差放大;②随着阀门的逐渐关闭,真实 MSV 部件对附近的流体具有一定的导流作用,而节流阀计算模型因为取消了真实的阀门结构,忽略了这种阀门的导流作用,导致节流阀模型计算结果中分流环上游的流体发生了更强的折转。这种导流作用在阀门开度较大时不显著,随着阀门关闭程度越大,导流作用逐渐增强,也会导致阀门开度较小时误

差较显著。

4.4 模式转换风扇部件气动特性

图 14 给出了常规风扇结构模型计算得到的风扇气动特性线,以及基于节流阀模型和三维 MSV 建

模得到的风扇模式转换过程气动特性线。图中点 A 为模式转换过程起始点(即风扇设计点),B,C,D 为过渡工况点,E 为阀门近似关闭点,6 个特征工况点分别对应开度 S 为 1.0,0.6,0.4,0.2,0.06。

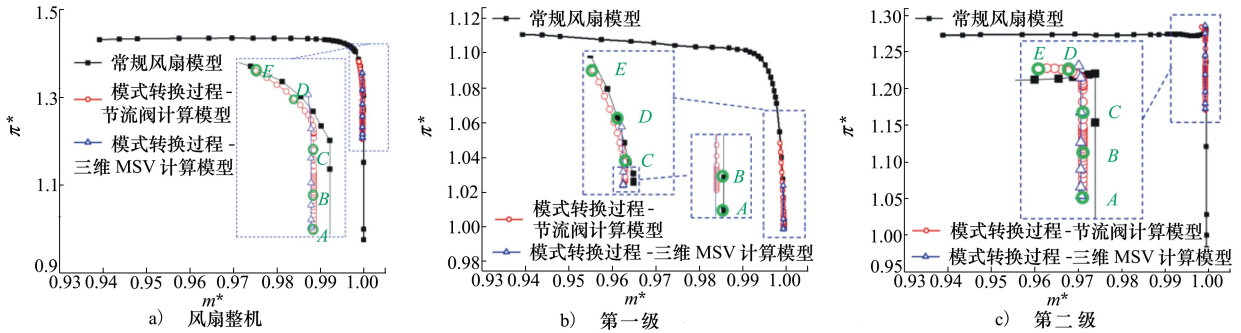


图 14 常规特性及模式转换过程气动特性线

从整机及各级特性线可以看出,在模式转换过程中,变循环压缩系统风扇特性沿着常规压气机特性线变化。在模式转换过程刚开始进行时,风扇第一级转子压比和效率并没有明显变化,进行到 C 点之后时,才有了较大增幅,存在滞后性;对于风扇第二级,随着模式选择阀门的关闭,压比和效率均不断提高,在阀门即将关闭时,增长速度减慢。从整体上来说,在模式选择阀门关闭的过程中,第二级风扇性能变化更剧烈(从图 9 中也可以看出这一点),第一级风扇性能变化存在滞后性,在整个模式转换过程

中风扇第二级压比提高了 9.6%,第一级压比提高了 4.8%。

另外,从图中对比可以看出,该双涵道变循环压缩系统风扇部件在模式选择阀门关闭的过程中,气动特性线的变化与常规风扇特性线几乎重合,模式选择阀门在外涵道的径向局部节流效应并未对风扇特性产生较大影响。为了解释这一点,以模式转换过程 C 点为例,选取截面 $Q_1 \sim Q_4$ (如图 6 所示),分析这 4 个截面的气动参数径向分布情况,如图 15 所示。

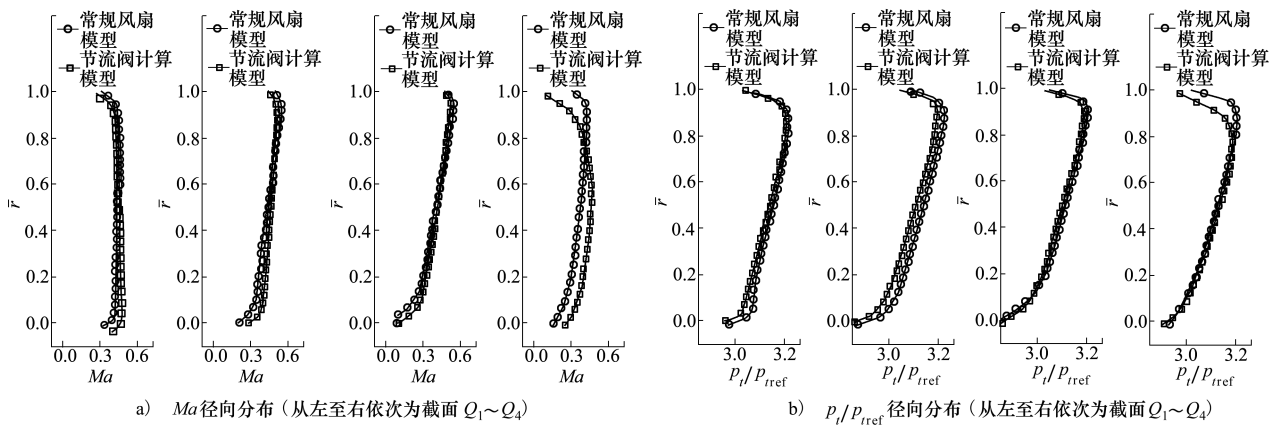


图 15 中介机匣不同轴向位置气动参数径向分布

从图中可知,从分流环前缘至上游压气机出口,常规风扇部件和变循环模式转换过程的气动参数径向分布的差异逐渐变小,到第二级静子出口区域二者已没有太大的差异。可以看出经过中介机匣对流动的整理作用,外涵道局部节流对流动径向分布规

律的影响并未传递至上游风扇部件出口,因此模式转换过程中风扇气动特性依然沿着风扇的常规特性线变化。

5 结 论

1) 节流阀模型建立了模式选择阀门开度 S 与节流阀系数 k 的对应关系, 而且节流阀系数与阀片开合角度无关, 仅与阀门面积比开度有关, 因此该节流阀模型对不同运动角度范围的模式选择阀门具有普适性;

2) 基于节流阀模型的数值模拟方法对风扇整机及各级压比预测误差不超过 1.93%, 效率误差不超过 1.05%, 均在合理范围内, 整体吻合良好。节流阀模型特征边界与真实 MSV 位置存在差异, 以及节

流阀模型忽略了真实 MSV 对附近流体的导流作用, 是当前计算模型误差产生的 2 个主要原因;

3) 中介机匣对流动的整理作用使外涵道局部节流导致的分流环位置的径向流动分布变化没有传递至上游风扇出口, 因此在模式转换过程中, 该双涵道压缩系统的风扇部件气动特性依然沿着常规风扇部件特性线移动; 在模式选择阀门关闭过程中, 风扇第一级在阀门开度大于 0.4 之前, 压比和效率特性几乎保持不变, 阀门开度小于 0.4 之后气动性能才发生明显变化, 对阀门关闭的响应存在滞后性; 第二级风扇性能变化更剧烈, 在整个阀门关闭过程中都发生显著变化。

参考文献:

- [1] 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 engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(3): 1-5 (in Chinese)
- [2] JOHNSON J. Variable cycle engines-the next step in propulsion evolution[C]//12th Propulsion Conference, 1976
- [3] BROWN R. Integration of a variable cycle engine concept in a supersonic cruise aircraft[C]//Joint Propulsion Conference, 2013
- [4] VDOVIK J W, EBACHER J A. VCE test bed engine for supersonic cruise research[R]. NASA 19810009476
- [5] SULLIVAN T J, PARKER D E. Design study and performance analysis of a high-speed multistage variable geometry fan for a variable cycle engine[R]. NASA-CR159545, 1979
- [6] HOFFMAN S. Bibliography of supersonic cruise aircraft research(SCAR) program from 1972 to Mid-1977[R]. NASA-RP-1003 197
- [7] JOHNSON J E. Variable cycle engine developments at general electric-1955-1995[C]//Developments in High-Speed Vehicle Propulsion Systems, Reston, 1996
- [8] PICCIRILLO A C. Origins of the F-22 raptor[C]//AIAA & SAE, World Aviation Conference, 2013
- [9] 刘增文, 王占学, 蔡元虎, 等. 变循环发动机模态转换数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2128-2132
LIU Zengwen, WANG Zhanxue, CAI Yuanhu, et al. Numerical simulation on bypass transition of variable cycle engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2128-2132 (in Chinese)
- [10] 周红, 王占学, 张晓博, 等. 变循环发动机模态转换的几何调节规律[J]. 航空动力学报, 2015, 30(9): 2160-2166
ZHOU Hong, WANG Zhanxue, ZHANG Xiaobo, et al. Geometry regulating law of variable cycle engine during mode transition [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(9): 2160-2166 (in Chinese)
- [11] 韩佳, 孙立业, 张跃学. 变循环发动机双外涵匹配研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(1): 53-57
HAN Jia, SUN Liye, ZHANG Yuexue. Study on double bypass matching of variable cycle engine[J]. Aeroengine, 2015, 41(1): 53-57 (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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)

- [15] 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)
- [16] LIU B, WANG R, YU X. On the mode transition of a double bypass variable cycle compression system[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 98: 105743
- [17] CUMPSTY N A. Compressor aerodynamics[M]. Florida: Longman Group, 1989
- [18] 赖安卿. 核心机驱动风扇级气动布局研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013
- LAI Anqing. Research on aerodynamic design of core driven fan stage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (in Chinese)

A method for numerical simulation of mode transition process of compression system of variable cycle engine based on throttle valve model

WANG Hao, LIANG Xiwen, MA Qinghua, WANG Yangang

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

Abstract: In order to study the aerodynamic characteristics of the compression system of a variable-cycle engine during its mode transition, a low-order model was established based on the throttle valve theory to describe the throttle characteristics of the mode selection valve at its different opening degrees. The model was applied to the outlet of a double-bypass variable-cycle fan in the form of characteristic boundary. A 3D low-order hybrid computational model was established for the numerical simulation of flow fields in the mode transition process of the compression system. The calculation accuracy and effectiveness of the throttle valve model were verified by comparing its calculation results with those of the 3D valve model. The simulation method was further applied to the prediction and analysis of the fan performance variation during the single and double bypass mode transitions of the variable-cycle fan. The simulation results show that: the throttle coefficient, which represents the throttle intensity, has something to do only with the flow area ratio of the valve but has nothing to do with its angle. Therefore, the throttle valve model is universal for valves with different motion angles; the throttle valve model can accurately predict the variation trend of the aerodynamic characteristics of the fan in all stages of the mode transition process. Compared with the 3D valve model, the prediction error of the pressure ratio of the fan in all stages is less than 1.93%, and the efficiency error is less than 1.05%. In the valve closing process, the second-stage rotor performance changes more dramatically, and the first-stage rotor performance changes with lag.

Keywords: variable cycle engine; mode transition; throttle model; numerical simulation

引用格式: 王昊, 梁熙文, 马庆华, 等. 基于节流阀模型的变循环压缩系统模式转换过程数值模拟方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(2): 306-315

WANG Hao, LIANG Xiwen, MA Qinghua, et al. A method for numerical simulation of mode transition process of compression system of variable cycle engine based on throttle valve model[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(2): 306-315 (in Chinese)