

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220798-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220798

核心驱动风扇与压气机匹配特性研究

黄磊^{1,2}, 张军², 何旭东¹, 李清华², 楚武利¹, 肖双强²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 为了提高带核心驱动风扇的压气机的气动性能, 研究核心驱动风扇与压气机的匹配设计技术是非常必要的, 两者的匹配对下一代发动机核心压缩部件性能至关重要。核心驱动风扇与压气机的匹配设计需要考虑 4 个主要的方面: 一维匹配设计、子午布局匹配设计、叶片造型参数匹配设计和二维流场匹配, 在此设计基础上开展全三维的匹配分析以及部件试验验证。试验结果表明: 串装试验结果与全三维模拟的不同涵道比的核心驱动风扇和压气机特性变化趋势是一致的, 验证了高效率核心驱动风扇与压气机匹配设计方法的有效性, 揭示了核心驱动风扇和压气机性能匹配随涵道比变化的基本规律, 涵道比增加, 核心驱动风扇压比匹配低, 从而导致压气机压比匹配得更高, 反之涵道比减小, 压气机匹配压比则更低。

关 键 词: 核心驱动风扇; 压气机; 匹配特性; 涵道比; 高效率

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

The matching performance research of core driven fan stage and compressor

HUANG Lei^{1,2}, ZHANG Jun², HE Xudong¹, LI Qinghua²,
CHU Wuli¹, XIAO Shuangqiang²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to improve the aerodynamic performance of compressor with core driven fan stage, it is essential to study the matching of core driven fan stage and high pressure compressor, which is of great importance to the core compressor component on next generation engine. Four issues should be considered on the matching of core driven fan stage and high pressure compressor: the matching design of one-dimensional, the matching design of through-flow, the matching design of blade modeling parameter, the matching of two-dimensional flow field, then three-dimensional simulation analysis and testing investigation were carried out. The testing results showed that: the variation tendency of core driven fan stage and high pressure compressor performance was coincident with three-dimensional simulation and the testing results, which verified the effectiveness of the matching performance of high efficiency core driven fan stage and high pressure compressor. By increasing the bypass ratio, the pressure ratio of core driven fan stage could be lower, bringing about the increase of the pressure ratio of high pressure compressor. On the contrary, the decrease of bypass ratio could lead to the lower pressure ratio of high pressure compressor.

收稿日期: 2022-10-18

作者简介: 黄磊(1983—), 男, 研究员, 博士生, 主要从事航空发动机高性能压气机设计技术研究。

引用格式: 黄磊, 张军, 何旭东, 等. 核心驱动风扇与压气机匹配特性研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220798. HUANG Lei, ZHANG Jun, HE Xudong, et al. The matching performance research of core driven fan stage and compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220798.

Keywords: core driven fan stage; compressor; matching performance; bypass ratio; high efficiency

未来战斗机发动机向着具有更高推质比、更宽工作范围、多用途、高可靠性以及高性价比的方向发展。下一代发动机可以使战斗机的航程和续航时间大幅度增加,变循环技术是研制未来高性能发动机的一项关键技术,在未来军事和民用方面都有广泛的应用前景。

为了满足先进战斗机大功率状态高单位推力和部分功率状态低耗油率的要求,航空先进国家的有关研究机构开展了带核心驱动风扇(core driven fan stage, CDFS)的发动机研制和设计工作,并在工程中实现了应用^[1-4]。风扇和 CDFS 出口都设有独立的涵道,并结合其可调进口导流叶片,以便在宽广的范围内更好地调节空气流量,以实现不同工作模式下的内外涵流量最佳分配^[5]。从发动机负荷量分配方面来看,通过将风扇最后一级移到高压转子上,重新分配高、低压涡轮的负荷,使高、低压涡轮都能够采用单级设计,从而降低发动机的质量。

CDFS 同传统的风扇布局相比,是在双涵道中将风扇部件分为前后两部分,前一部分依然由低压涡轮驱动,而后一部分由核心机,即高压涡轮驱动,因此将该部分由核心机驱动的风扇级称为核心机驱动风扇级。CDFS 和高压压气机(high pressure compressor, HPC)由高压涡轮同时驱动。

下一代发动机有别于现役的涡喷、涡扇发动机,更应充分认识到其技术难度和风险:GE 公司已持续发展了 4~5 代发动机技术^[6-8],循序渐进,形成对下一代发动机深厚的技术积累,虽如此,为化解这项技术的风险,美国这样的航空技术领先国家还需要开展专项研究计划,动员本国骨干厂商共同攻关。其中国外关于 CDFS 与压气机的匹配特性研究作为关键技术之一,对此开展了大量的先期研究和验证。

国内下一代发动机还处于起步阶段,主要集中在根据下一代发动机的特点进行数学建模研究,完成了过渡态和稳态的数值仿真工作^[9-13],另外,张鑫等^[14-16]针对 CDFS 的气动设计也开展了一定的研究工作,总结了 CDFS 气动设计的特点和难点,指出了可调导叶出口预旋分布对 CDFS 的性能有重要影响、转子设计需要控制好激波损失,并对 CDFS 的单级特性进行了分析研究,赖安卿

等针对 CDFS 进行设计研究以及优化研究^[17-18],但是这些研究都没有进行相关的试验验证,马昌友等^[19]针对 CDFS 与压气机的匹配试验的外涵排气系统进行设计与试验验证,该研究虽然有试验验证,但是主要是试验方法和试验数据分析的角度开展的研究,黄磊等^[20-21]进一步针对 CDFS 这类高切线速度低压比的单级风扇进行了设计与试验验证及数值优化研究。

综上所述,国外对下一代发动机虽然做了大量的研究验证工作,但是关于 CDFS 与压气机匹配研究的可查文献相对较少,而国内虽然对 CDFS 进行了一些研究工作,大部分都是数值研究,都未针对 CDFS 与压气机的匹配特性进行相关的研究与试验验证工作。

本文针对某 CDFS 与压气机进行匹配特性研究与试验验证,首先完成子午流路的匹配和流场的匹配,在此基础上开展全三维的匹配特性分析,研究了不同涵道比对性能的影响,最终通过试验验证了匹配特性规律。该研究成果可为下一代发动机的研制提供技术支持,尽快缩短我国航空发动机与美国等先进的航空发动机的差距。

1 CDFS 与压气机的匹配特性研究

CDFS 串装压气机设计过程中,CDFS 和压气机单独设计成功只是必要条件之一,另一关键技术是 CDFS 与压气机的匹配设计,只有解决了匹配问题才能确保 CDFS 串装压气机稳定、高效工作。CDFS 与压气机在同一根轴上工作,物理转速一致;CDFS 与压气机之间还存在一个第二涵道,因此两者物理流量不一致,涵道比的变化对 CDFS 与压气机一起工作有哪些影响,匹配点是如何变化的,这些都是需要研究的。因此主要从一维平均流线的匹配设计、CDFS 与压气机子午流路的匹配、叶片造型参数匹配、二维流场匹配和全三维匹配分析等方面进行研究。从图 1 中可以看出,第一外涵位于风扇出口的外涵,第二外涵位于 CDFS 出口的外涵。

1.1 一维匹配设计

在当今的准三维设计体系中,一维匹配设计是一台压气机的基础,能有效解决级间参数沿各级分布的匹配问题。在本文的研究中,首先开展

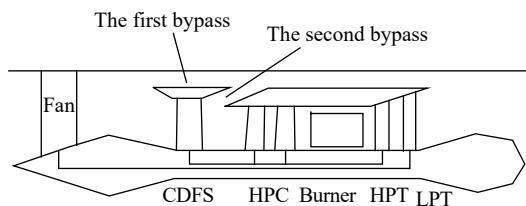


图 1 CDFS 概念图

Fig. 1 Concept map of CDFS

一维匹配设计, 为了兼顾 CDFS 与压气机的效率和喘振裕度, 设计时采用抬高压比设计的方式, 根据压气机从前到后换算切线速度逐级降低的特点, 因此负荷的分配除了发动机对 CDFS 有特定的要求外, 四级压气机的负荷从前到后逐级降低的。为了使各级在各自能力范围内尽量发挥其做功能力, 经过多轮的一维方案论证和迭代发现如图 2 的负荷系数分布是比较合适的, 其可以兼顾各转速的效率和喘振裕度。

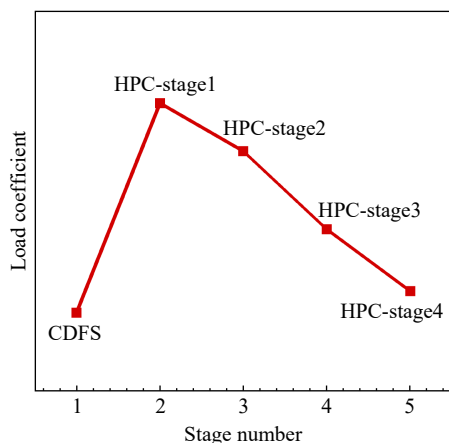


图 2 核心驱动风扇与高压压气机级负荷分布

Fig. 2 Loading distribution for CDFS and HPC

1.2 子午流路的匹配设计

流路的匹配与 CDFS 的第二外涵流量匹配紧密相关, 在尽可能短的距离里, 将 CDFS 出口流量分配到第二外涵和压气机中, 既要保证压气机进口流场的品质, 同时要保证第二外涵引气量, 因此第二外涵的设计显得尤为关键。在 CDFS 和压气机分别完成设计和试验验证后, 两个部件串装的流路匹配的难点就变为两者中间过渡段的设计, 第二外涵在气动设计上要使气流顺利引出, 在结构设计上要使压气机导叶调节的轴顺利通过, 因此第二外涵和支板的最终方案是气动和结构设计同步进行、相互迭代的结果。

在第二外涵设计中, 总体对轴向尺寸有限制, 要求 CDFS 与压气机接口段轴向长度短, 按光滑

流线设计第二外涵流道存在相当大难度; 且外涵引气量大, 不同于常规放气或抽气概念, 气动设计一方面直接关系到 CDFS 出口尖部工作区性能的变化, 影响 CDFS 总性能, 另一方面使压气机进口参数产生径向不均匀变化, 会对压气机尖部性能产生较大影响, 进而影响部件匹配工作。第二涵道结构设计既要满足气动方面的要求, 使得外涵引气对内涵流动的影响最小, 同时, 还要满足机匣传力的合理可靠以及静子叶片调节结构合理布置的要求, 采用传统的“集气腔+引气”的结构形式将不能满足联合试验的要求, 需进行创新设计, 采用外涵带支板结构形式。

图 3 给出了核心驱动风扇与高压压气机匹配的原始气动布局。在核心驱动风扇末级静子出口和高压压气机进口导叶之间有一定的高度差便于第二外涵引气, 通过调整核心驱动风扇末级静子出口机匣流道曲率, 具体过程就是核心驱动风扇末级静子叶尖流道呈一种前高后低收敛的形式, 到了核心驱动风扇叶尖出口位置圆滑过渡到第二外涵流道, 这样就可以保证气流在核心驱动风扇末级静子出口叶顶处均匀扩散不发生分离。第二外涵支板轴向长度和径向高度要求在结构限制范围内, 同时高压压气机进口导叶可调, 导叶转轴穿过第二外涵支板, 对外涵支板的最大相对厚度和最大相对厚度位置进行了限制。在结构限制范围内利用定制叶型程序对第二外涵支板进行了造型设计, 图 4 给出了外涵支板根部和尖部叶型, 叶型最大相对厚度位置在根部靠前, 尖部靠后, 以保证高压压气机进口导叶调节轴能穿过支板并正常工作。在设计完成后通过三维计算分析对第二外涵流道及支板结构进行优化, 图 5 给出了核心驱动风扇与高压压气机匹配优化后的子午投影。

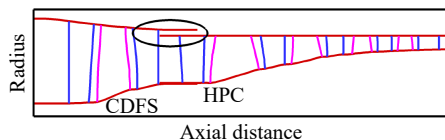


图 3 核心驱动风扇与高压压气机匹配的原始气动布局

Fig. 3 Original flow path for CDFS and HPC

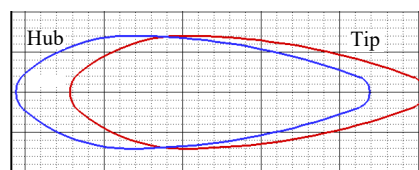


图 4 外涵支板根部和尖部叶型

Fig. 4 Blade profile in hub and tip of external duct

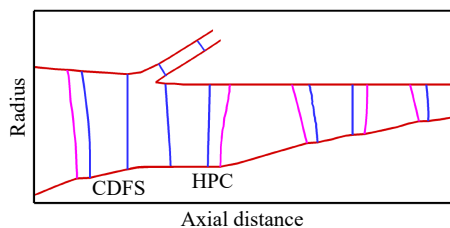


图 5 核心驱动风扇与高压压气机匹配优化后的子午投影

Fig. 5 Optimized meridian projection for CDFS and HPC

1.3 叶片造型参数匹配设计

在一维设计确定各级参数分配和子午流路匹配设计基础上,开展叶片造型参数匹配设计,通常情况下,压气机在低换算转速会出现前堵后堵,即前面级压气机在大的正攻角下工作,后面级在大的负攻角下工作,而高换算转速会出现前堵后喘,即前面级压气机会在大的负攻角下工作,而后面级在大的正攻角下工作。由于不同转速工作状态的不同加之 CDFS 本身的特点,因此转静子攻角的选择需要结合各级负荷分配来兼顾各个转速的性能,经过研究发现,转子攻角分布如图 6 所示,攻角从进口级到后面级逐渐减小,为了减轻出口级低转速的堵塞问题,出口级叶片需要打开一些,即增加攻角来减小其安装角,这样出口级的攻角就会与第三级转子攻角接近,这样的分布可以兼顾 CDFS 与压气机在各转速的性能。

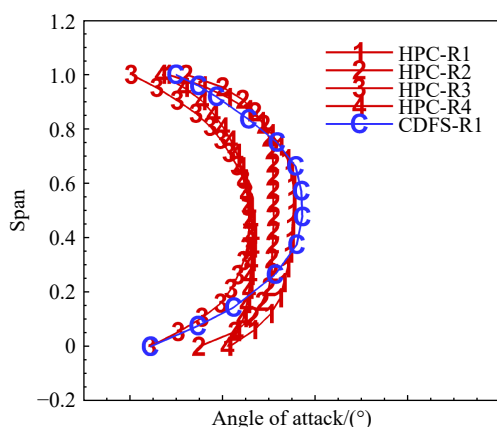


图 6 核心驱动风扇与高压压气机的转子攻角沿展向分布

Fig. 6 Spanwise distributions of angles of rotor attack for CDFS and HPC

1.4 二维流场的匹配

在完成一维、子午流路以及造型参数匹配的基础上,本节对二维流场的匹配开展分析,在 S2 流面设计分析基础上,再进行详细的全三维分析可极大减少方案寻优的时间。采用具有双涵道功能的 S2 流面设计程序对 CDFS 与 HPC 进行联合

计算,能更加准确地预估 CDFS 与压气机的匹配流场。

针对双涵道设计需求,通过在通流迭代中计算各流管流量,自动修正分流驻点的几何位置以满足设计涵道比的要求。

图 7 和图 8 分别为 CDFS 与 HPC 串装得到的各排叶片马赫数和静温分布,通过一体化设计 S2 流面计算得到的结果表明,前面几级转子的叶尖相对马赫数处于超音状态,静子都处于亚音状态,且第二外涵支板的马赫数也没有明显的低速区,说明子午流道设计合理,而静温处于逐级增加的状态,马赫数分布和静温分布基本合理。

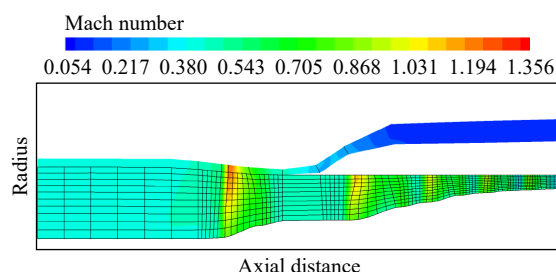


图 7 核心驱动风扇与高压压气机马赫数云图

Fig. 7 Mach number cloud map of CDFS and HPC

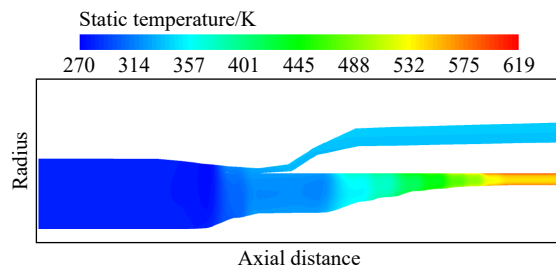


图 8 核心驱动风扇与高压压气机静温云图

Fig. 8 Static temperature cloud map of CDFS and HPC

1.5 双涵道全三维性能匹配研究

为了研究涵道比变化对 CDFS 和压气机性能匹配的变化情况,本文的三维数值模拟由商业软件 NUMECA 完成,在匹配研究之前,首先需要对网格无关性进行研究,探寻网格规模对计算结果的影响。本文采用 NUMECA 软件包中的 AUTOGRID5 模块自动生成 O4H 网格拓扑结构,以定常数值模拟对带 CDFS 的压气机进行分析,采用 grid1、grid2 和 grid3 共 3 套网格,网格数约分别为 480 万、628 万和 800 万,开展定常计算数值模拟进行网格无关性分析,计算过程采用雷诺平均 Navier-Stokes 方程、2 阶精度的中心差分格式,湍流模型为 S-A(Spalart-Allmaras)模型。保证壁面处

$Y^+ < 10$ 。边界条件给定进口绝对总温、绝对总压和进口气流角, 内涵出口给定平均静压, 第二外涵出口给定固定流量, 通过给定压气机出口不同背压来实现喘喘, 而外涵流量配合着所需的涵道比进行适当的调节, 计算不同涵道比的特性时, 通过改变外涵的引气量来实现涵道比的变化。经过网格无关性验证, 628 万网格可以认为数值模拟结果是可靠的。

在完成网格无关性研究的基础上, 采用全三维软件 NUMECA 对 CDFS 串装压气机部件的不同转速进行了数值模拟, 分别计算了设计涵道比、增加涵道比(相对设计涵道比增加 25%)和减小涵道比(相对设计涵道比减小 25%)这 3 个方案的计算。

图 9 为不同涵道比 1.0、0.95、0.9 转速 CDFS 串装压气机三维计算总特性, 从总的特性可以看出在 1.0 转速, 当增加涵道比时, CDFS 的压比匹配点(即 CDFS 与 HPC 一起工作时, CDFS 的工作压比)更低, 处于接近堵点的位置, 流量不再增加, 因此设计涵道比与增加涵道比的进口总流量相当。而 0.9 和 0.95 转速所选取的涵道比都较小, 以致外涵流量都没有达到最大限制, 当 CDFS 的压比没有匹配在近堵点和外涵流量没有达到最大限制时, 涵道比的变化对 CDFS 进口流量影响比

较明显, 总体来说, 涵道比增大, CDFS 进口流量增加, 效率提高; 反之, 各转速涵道比减小, CDFS 进口流量减小, 效率降低。

图 10 为 1.0 转速设计涵道比下的外涵支板近工作点不同叶高相对马赫数分布, 不同叶高分别为 22% 叶高、50% 叶高、75% 叶高, 从图中可以看出, 由于结构的限制, 支板叶型最大厚度较大, 轴向弦长较短, 气流在叶片前缘轮毂出现滞止分离, 同时在尾缘处也存在分离, 该分离对主流道影响较小, 也验证了子午流道设计的合理性。

图 11 为不同涵道比下 1.0~0.9 转速 CDFS 串装压气机三维计算特性中 CDFS 的特性, 从不同涵道比 CDFS 的特性与单独计算 CDFS 的特性(即 CDFS 独立工作的计算特性)对比可以看出,

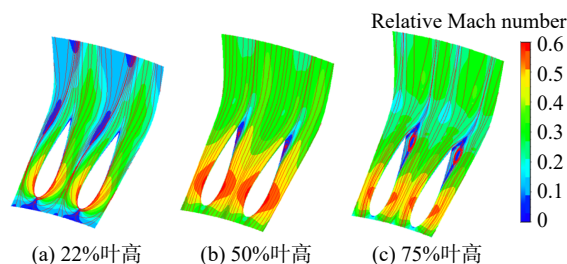


图 10 外涵支板近工作点不同叶高相对马赫数分布
Fig. 10 Relative Mach number distribution of external duct strut at different height on working point

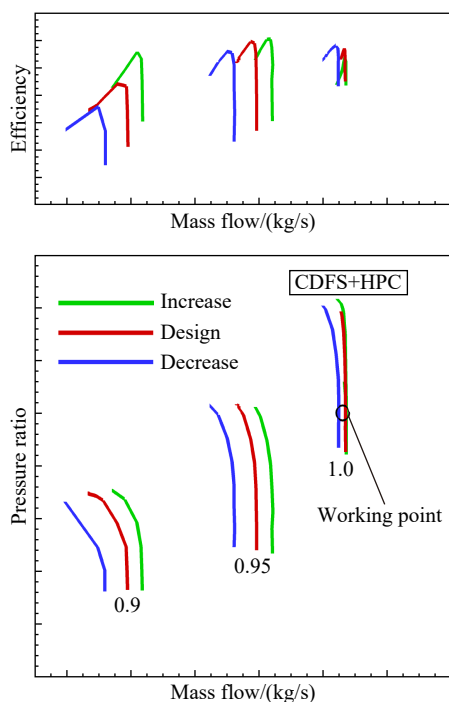


图 9 不同涵道比下的核心驱动风扇与高压压气机总特性

Fig. 9 Total performance in different bypass ratios of CDFS and HPC

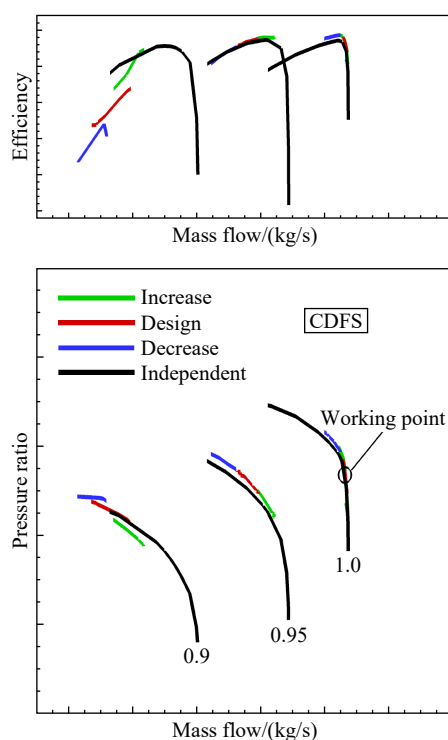


图 11 不同涵道比下核心驱动风扇总特性

Fig. 11 Total performance in different bypass ratios of CDFS

1.0 相对换算转速的 CDFS 串装压气机时, 由于是压气机先进入喘振, 因此 CDFS 并没有发挥最大的工作能力, 其工作区间只在其特性中的一小段, 即 CDFS 并未喘振; 而随着从高转速到低转速, CDFS 串装时的工作点沿 CDFS 单独计算的特性线左边移动, 转速越低, 离喘振边界越近, 效率略降低; 每个转速 CDFS 的工作点随着涵道比的增加沿着 CDFS 单独计算的特性线向右边移动, 远离喘振边界, 效率增加, 说明当涵道比增加时, CDFS 匹配的压比点降低。另外 0.9 转速设计涵道比和减小涵道比的特性超过了单独计算 CDFS 的特性边界是因为 CDFS 单独计算的时候可能还没有计算到真正的喘振边界。

图 12 为不同涵道比下 1.0~0.9 转速 CDFS 串装压气机三维计算特性中压气机的特性, 从不同涵道比 CDFS 串装压气机中压气机的特性与单独计算压气机的特性对比可以看出, CDFS 串装压气机时, 压气机的特性变化并不像 CDFS 那么显著, 工作范围没有明显变化; 无论涵道比增加还是减小, 压气机特性只是少量的平移, 效率比单独计算略低, 压气机的边界没有明显的变化, 说明压气机的工作范围已经发挥到极限了, 率先发生失速。

从上面不同涵道比变化, CDFS 串装压气机的特性来看, 高转速下涵道比变化对 CDFS 串装

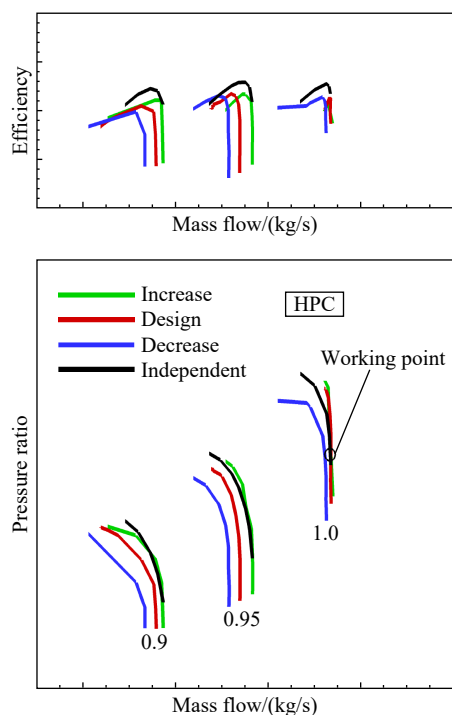


图 12 不同涵道比下高压压气机总特性

Fig. 12 Total performance in different bypass ratios of HPC

压气机的总性能以及其中的 CDFS 和压气机的性能影响都不明显; 由于 CDFS 串装压气机各转速的稳定裕度都较大, 因此随着转速降低, 适当增加涵道比可以使得 CDFS 串装压气机的效率提升。该研究成果可以为总体性能优化核心压缩部件提供优化方向, 同时为控制规律的制定提供数据支持。

图 13 为 CDFS 串装压气机设计转速不同涵道比条件下工作点 95% 叶高的相对马赫数云图, 从图中可见, 随着涵道比从减小涵道比到设计涵道比时, CDFS 外涵流量增大, CDFS 进口流量同样增大, 其叶尖激波位置后移, CDFS 匹配压比降低, 而进一步增大到增加涵道比时, CDFS 匹配在堵点, 进口流量不再增加, 其尖部的激波位置也几乎不变了, 而压气机的流场变化不大, 图 13 所展示的流场特征与图 9 的特性趋势相互印证。

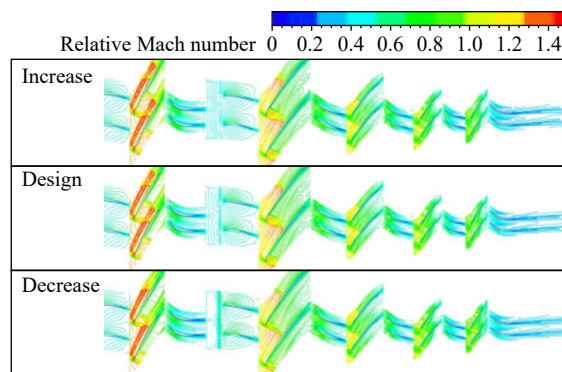


图 13 工作点 95% 叶高相对马赫数分布云图

Fig. 13 Contours of relative Mach number distribution of 95% height on working point

2 匹配特性试验验证

在完成 CDFS 与压气机的匹配特性研究的基础上, 完成了 CDFS 与压气机串装试验件的设计、加工, 该试验件在中国航发四川燃气涡轮院全台压气机试验台上开展了相关的性能试验。本次试验采用电子压力扫描阀、数据采集系统和动态采集系统, 在试验开始前, 对测试系统进行了计量标定。经过精度分析, 进出口总压的测量精度为 $\pm 0.2\%$, 进出口总温的测量精度为 $\pm 0.6\%$, 测量精度满足试验要求。

试验件进口平均总压通过 3 支径向 6 点梳状总压探针测取主流区压力, 进口总温通过在进口稳压箱内放置 4 支铂电阻, 取其算术平均值来获取。试验件出口测量截面总压、总温参数通过沿周向不同叶片槽道中布置的 6 支 3 点总温总压梳

状复合探针,来测取总温总压在一个栅距内沿周向和径向的分布,再通过面积积分得到出口平均总压、总温值。

为了在 CDFS 与 HPC 串装环境下分别获取 CDFS 与 HPC 的总性能,在 HPC 进口导叶前缘各安装了径向 6 点总温和总压叶型受感部,外涵支板前缘安装了各安装了径向 3 点总温和总压叶型受感部。通过 HPC 进口导叶前缘安装的总温总压叶型受感部来测取 HPC 进口总温总压;通过 HPC 导叶前缘和外涵支板前缘安装的总温总压叶型受感部来测取 CDFS 出口总温总压。

试验过程中通过调节第二外涵的引气量来保证所需的涵道比,录取特性线时通过调节排气节气门的开度,控制出口反压来实现不同特性点的录取,当随着排气节气门的开度不断关闭,压比随着提高,同时调节外涵的引气量保证所需的涵道,直到压气机进入喘振,录取到所有的特性点。

2.1 串装总特性分析

图 14 为 CDFS 串装 HPC 不同涵道比下的试验特性与三维计算的对比。试验过程中考虑到试验安全性,并未做相对换算转速 0.95 和 1.0 的不同涵道比的试验,因此本试验特性只给出了相对换算转速 0.8~0.9 的不同涵道比总性能。在不同内、外涵背压情况下,成功模拟发动机总体要求

的主要涵道比范围,通过不同涵道比调节试验,初步掌握了 CDFS 串装压气机的调节控制规律。试验过程中,相对于设计涵道比,增加涵道比的增加量为 25%,减小涵道比的减小量为 25%,涵道比的具体值与数值仿真的对应值保持一致。试验结果表明涵道比与特性有密切联系,总体来说,涵道比加大,CDFS 串装压气机总的流量增加,同时效率增加,反之,涵道比减小,CDFS 串装压气机总的流量减小,同时效率降低,这个与数值模拟的趋势是一致的,只是三维计算的流量比试验结果都偏大一些,这也符合通常的规律,说明三维数值模拟方法有足够的仿真精度能够有效指导 CDFS 和压气机的匹配设计。

2.2 串装中 CDFS 特性分析

图 15 为串装试验中的不同涵道比 CDFS 特性和三维计算的对比,从中可以看出串装中 CDFS 的工作范围在 0.9 转速以下的工作范围明显变窄,主要匹配在效率的左支,工作点接近 CDFS 单独试验特性的喘振边界。涵道比增加时,CDFS 匹配的工作点压比减小,匹配的工作范围变宽,效率处于高效率区,涵道比减小时,CDFS 的匹配的压比增加,效率有所下降,随着转速增加,工作点越远离喘振边界,这个趋势与数值模拟是一致的,只是三维计算的流量比试验结果都偏大一些,这

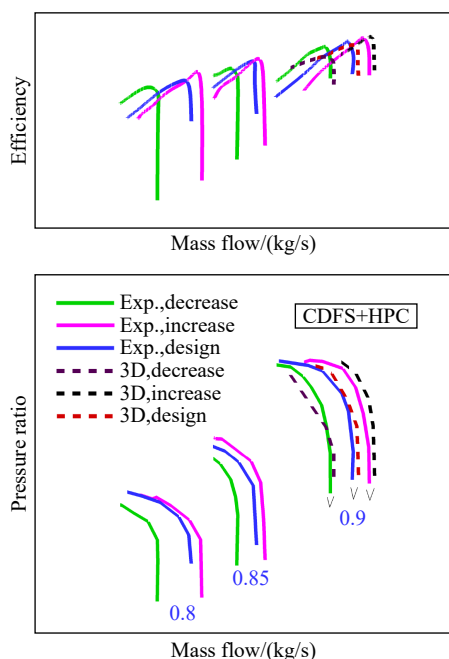


图 14 核心驱动风扇与高压压气机不同涵道比下的试验特性与三维计算的对比

Fig. 14 Comparison of testing and 3D calculation characteristic diagram in different bypass ratios of CDFS and HPC

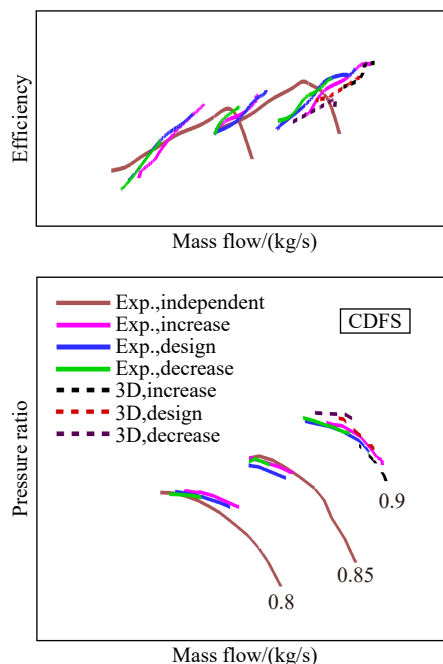


图 15 不同涵道比下的核心驱动风扇试验特性和三维计算的对比

Fig. 15 Comparison of testing and 3D calculation characteristic diagram in different bypass ratios of CDFS

也符合通常的规律。

2.3 串装中压气机特性分析

图 16 为不同涵道比下 CDFS 串装压气机中压气机的试验特性与三维计算的对比,考虑到串装试验时压气机导叶的调节规律与压气机单独试验时调节规律有一定的差异,加之本节主要还是看涵道比变化对压气机的性能影响,因此图 16 中并未放置压气机单独试验时的特性线,总的趋势来看,压气机的特性并不像 CDFS 变化得那么显著,涵道比增加,CDFS 压比匹配低,从而导致压气机的压比匹配得高,最高效率变化不大,反之涵道比减小,压气机压比匹配的则低。压气机的特性在串装时进行一定的平移,但边界基本没有变化,说明压气机的工作范围已经发挥到极限了,率先发生失速,这个和前面数值模拟的趋势是一致的,只是三维计算的流量比试验结果都偏大一些,这也符合通常的规律。

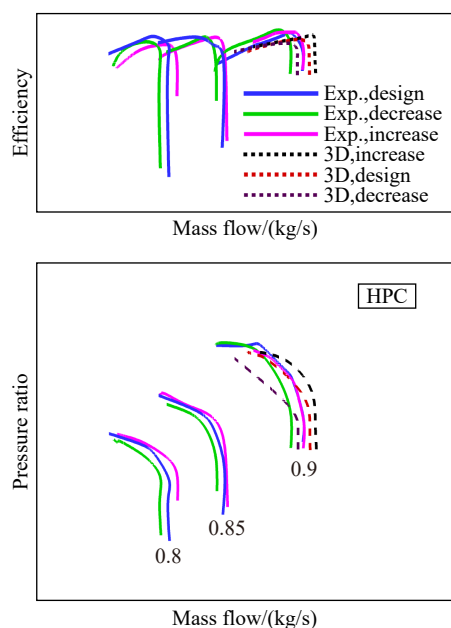


图 16 不同涵道比下的高压压气机试验特性与三维计算的对比

Fig. 16 Comparison of testing and 3D calculation characteristic diagram in different bypass ratios of HPC

试验结果表明: CDFS 串装压气机性能试验结果与全三维模拟的不同涵道比的 CDFS 和压气机特性变化趋势是一致的,试验结果验证了高效率 CDFS 与压气机匹配设计方法的有效性。

3 结 论

本文开展了高效率 CDFS 与压气机匹配特性

技术研究,并将研究成果用于 CDFS 与压气机设计中,并通过试验验证了该技术的有效性,得到的 CDFS 与压气机匹配特性规律与试验特性规律的趋势也比较吻合,可以得出以下结论:

1) CDFS 与压气机的负荷分配以及转子攻角选择需要兼顾各转速的效率和喘振裕度,尽量发挥各级不同工况的工作特点。

2) CDFS 与压气机的子午流路设计有别于常规压气机,两者之间的第二外涵设计显得比较重要,该外涵要实现低损失的大流量引气来达到整机匹配所需的涵道比。

3) 针对 CDFS 与压气机单轴双涵的特点,两者性能相互作用明显,经过数值和试验共同研究发现,涵道比加大,CDFS 串装压气机总流量增加,总效率增加,CDFS 匹配的工作点压比减小,压气机匹配的工作点压比增加,反之,涵道比减小,CDFS 串装压气机总流量减小,总效率降低,CDFS 匹配的工作点压比增加,压气机匹配的工作点压比减小。

4) 在涵道比变化时,0.95 以下转速 CDFS 的进口流量变化较大,压气机进口流量变化较小,说明涵道比增加时,CDFS 进口增加的流量,大部分经第二外涵排出。

5) 采用 NUMECA 三维仿真工具,在合理选择网格规模、湍流模型等设计参数的前提下,其计算结果呈现的 CDFS 和压气机的特性匹配规律和试验所呈现的规律一致,对压气机多级匹配设计具有较强的指导意义。

6) 通过采用一维匹配、流路匹配设计、叶片造型参数匹配、二维流场匹配和双涵道全三维匹配特性研究以及匹配特性试验研究等技术,使 CDFS 与压气机在气动热力性能满足总体设计要求,数值和试验得到的匹配规律可以为两者的高效工作提供有效的数据支持,对类似带大级间引气的压气机级间匹配规律也具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 林雪平. 变几何发动机稳态性能计算研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
LIN Xueping. Study on steady-state performance calculation of variable geometry engine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] FRENCH M, ALLEN C. NASA VCE test bed engine aerodynamic performance characteristics and test results[C]//Proceedings of the

- 17th Joint Propulsion Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1981: AIAA1981-1594.
- [4] RALLABHANDI S, MAVRIS D. Simultaneous airframe and propulsion cycle optimization for supersonic aircraft design: AIAA 2008-143 [R]. Reston, Virginia: AIAA, 2008.
- [5] BROWN R. Integration of a variable cycle engine concept in a supersonic cruise aircraft: AIAA 1978-1049 [R]. Reston, Virginia: AIAA, 1978.
- [6] MURTHY S, CURRAN E T. Variable cycle engine developments at general electric-1955-1995[R]. AIAA 97-15033, 1997.
- [7] Vdoviak J W, Ebacher J A. VCE test bed engine for supersonic cruise research[R]. Hampton, US: NASA Langley Research Center, 1979.
- [8] ALLAN R. General Electric Company variable cycle engine technology demonstrator programs: AIAA 1979-1311 [R]. Reston, Virginia: AIAA, 1979.
- [9] 刘增文, 王占学, 黄红超, 等. 变循环发动机性能数值模拟[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1310-1315.
LIU Zengwen, WANG Zhanxue, HUANG Hongchao, et al. Numerical simulation on performance of variable cycle engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1310-1315. (in Chinese)
- [10] 刘增文, 王占学, 蔡元虎. 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. Numerical simulation on bypass transition of variable cycle engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2128-2132. (in Chinese)
- [11] 苟学中, 周文祥, 黄金泉. 变循环发动机部件级建模技术[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1): 104-111.
GOU Xuezhong, ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan. Component-level modeling technology for variable cycle engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(1): 104-111. (in Chinese)
- [12] 王元, 李秋红, 黄向华. 变循环发动机建模技术研究[J]. 航空动力学报, 2013, 28(4): 954-960.
WANG Yuan, LI Qiuhong, HUANG Xianghua. Research of variable cycle engine modeling techniques[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 954-960. (in Chinese)
- [13] 张荣, 叶志锋, 薛益春. 变循环发动机模式转换调节计划仿真研究[J]. 测控技术, 2011, 30(2): 47-50.
ZHANG Rong, YE Zhifeng, XUE Yichun. Simulation research on adjustment plan to mode transition of variable cycle engine[J]. Measurement & Control Technology, 2011, 30(2): 47-50. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 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, 58.
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, 58. (in Chinese)
- [16] 张鑫, 刘宝杰. 核心机驱动风扇级匹配特性分析[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 2850-2858.
ZHANG Xin, LIU Baojie. Matching characteristics of core driven fan stage[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 2850-2858. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 曹晖, 周正贵, 胡骏, 等. 兼顾两种模式核心机驱动风扇级气动优化设计[J]. 航空动力学报, 2018, 33(3): 717-728.
CAO Hui, ZHOU Zhenggui, HU Jun, et al. Aerodynamic optimization design of core driven fan stage on balance of two modes[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 717-728. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 黄磊, 周拜豪, 李清华, 等. 高切线速度低压比单级风扇设计技术及试验验证[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(6): 16-20.
HUANG Lei, ZHOU Baihao, LI Qinghua, et al. Design technology and experimental verification of a single stage fan with high tip speed and low pressure ratio[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2016, 29(6): 16-20. (in Chinese)
- [21] 黄磊, 余华蔚. 单级跨声速风扇转子叶片多目标优化设计[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(3): 30-34.
HUANG Lei, YU Huawei. Multi-objective optimization design of single-stage transonic fan rotor blade[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2016, 29(3): 30-34. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)