

文章编号: 1000-8055(2022)09-1946-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210112

变外涵工况下风扇增压级双涵匹配机理

郑 覃, 杨小贺, 叶 俊, 冯锦璋

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 针对某型民机大涵道比风扇增压级, 在不同外涵工况下开展数值计算, 旨在研究风扇增压级双涵性能匹配规律和相应机理。通过分析计算结果, 掌握了外涵工况对内涵特性的影响规律: 当外涵工况从近堵点移向近喘点的过程中, 内涵的流量、总压比、效率逐渐增大, 且内涵稳定裕度呈持续增大的变化规律。同时也在获取内涵特性时, 掌握了外涵气动性能的变化规律, 在不同外涵工况下阐明了内涵逼喘过程中双涵气动性能的相互匹配机理取决于风扇的总压比-流量特性和内外涵流量再分配机制的共同作用。

关 键 词: 民用航空发动机; 风扇增压级; 大涵道比; 双涵匹配机理; 流量再分配

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Twin-duct matching mechanism in fan booster under different bypass working conditions

ZHENG Tan, YANG Xiaohe, YE Jun, FENG Jinzhang

(Commercial Aircraft Engine Company Limited,

Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200241, China)

Abstract: Numerical research on a high-bypass-ratio fan booster of a civil-aircraft engine was conducted under different bypass working conditions, with the aim of understanding the twin-duct matching rule and corresponding matching mechanism. By analysis of the numerical results, it was understood that as the bypass working condition changed from the near choke point to the near surge point, the mass flow, pressure ratio and efficiency increased and the core surge margin first climbed up and then declined. In the process of acquiring core characteristics, the change law of bypass aerodynamic performance was mastered. Furthermore, during the forced surge process of the core, the twin-duct matching mechanism was subject to the combined actions of the fan characteristic of pressure ratio and mass flow and the redistribution of mass flow between the core and bypass.

Key words: civil-aircraft engine; fan booster; high-bypass-ratio; twin-duct matching mechanism; mass flow redistribution

大涵道比民用航空发动机有着大推力、低耗油率的需求, 其关键部件风扇增压级的设计趋于大涵道比、高效率、质量轻、低噪声等特点^[1-3]。研究人员对大涵道比风扇增压级的设计也越来越

关注。

在发动机实际使用过程中, 工况极为复杂, 风扇增压级的外涵和内涵工况往往会随着飞机飞行状态的改变而发生变化。飞机飞行马赫数的变化

收稿日期: 2021-03-12

作者简介: 郑覃(1992—), 男, 博士, 主要从事民机风扇增压级气动设计研究。

引用格式: 郑覃, 杨小贺, 叶俊, 等. 变外涵工况下风扇增压级双涵匹配机理[J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1946-1956. ZHENG Tan, YANG Xiaohe, YE Jun, et al. Twin-duct matching mechanism in fan booster under different bypass working conditions [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(9): 1946-1956.

会导致外涵工况改变,此时内涵气动特性的变化规律是需要重点关注的双涵性能匹配问题。而且,在风扇增压级部件试验中录取内涵气动特性时,会固定外涵工况不变,但是对于外涵固定在哪个工况更合适,目前尚无清晰的认识,这也是需要重点聚焦的双涵性能匹配问题。

目前在风扇增压级双涵性能匹配方面,仅有少量学者开展相关研究。1991年,Dawes^[4]以双涵道风扇模型为研究对象,开展了双涵联算,研究表明分流环会明显影响上游流动。21世纪初,赵永辉^[5]使用数值模拟方法对某型风扇增压级进行了内外涵道匹配研究,结果表明风扇会受到下游分流环和内外涵中的叶片的影响,分流环本身的气流攻角较大会使内涵进口导叶承受非常不均匀的气流。然而,在双涵性能匹配方面,以上的研究仅进行了简单的讨论,都未深入研究性能匹配规律和机理。

随着数值模拟方法的日益成熟,人们对叶轮机的研究由传统的主要依赖试验手段逐渐转变为以数值模拟研究为主、试验研究为辅的设计研究模式,这种模式有利于大幅缩短设计周期、降低研究成本,还使人们更深入地了解并研究各类试验无法企及的流动现象^[6-8]。对于大涵道比风扇增压级而言,越来越多的研究人员为了使数值模拟结果更好地反映风扇增压级内的真实流动^[9-11]而选择多排叶片双涵道联算。相关的研究内容包括波浪端壁设计^[12-13]、风扇掠型设计^[14-15]、风扇叶尖间隙^[16-17]、雷诺数效应^[18-19]、几何缩尺设计^[20]等因素对风扇增压级的影响。在上述的研究中,科研人员开展内涵性能曲线计算时,通常固定外涵出口边界条件,使外涵工况固定在气动设计点或最高效率点,然后改变内涵出口静压;开展外涵性能曲线计算时,同样给定内涵出口边界条件,使内涵工况固定为设计点或最高效率点,然后改变外涵出口静压。

事实上,外涵固定在不同的边界条件,会导致获取的内涵特性线有明显差异;而且,在获取内涵特性线的过程中,尽管外涵出口静压保持不变,外涵特性仍会发生变化。同样,在风扇增压级部件试验中也会遇到相似的内外涵匹配问题。如果不掌握内外涵道之间的相互匹配规律和机理,就难以判断试验测量或数值模拟得到的内外涵特性是否准确。

鉴于目前在风扇增压级双涵匹配方面的研究

仍然存在较大空白,本文针对某型民机大涵道比风扇增压级,在不同外涵工况下开展数值研究,改变内涵出口静压获取内涵和外涵特性线,在此过程中,掌握外涵性能的变化规律和外涵工况对内涵特性的影响规律,最终揭示双涵匹配机理,为“双涵道压缩系统中获取内涵性能曲线时外涵工况如何匹配”的工程应用问题提供建议。

1 数值计算方案构建

1.1 研究对象

以某型民机大涵道比风扇增压级为研究对象,使用商用软件 NUMECA 的 FINE/Turbo 求解器开展数值计算。如图1所示,风扇增压级计算模型包括风扇、外涵出口导叶和4级增压级。计算域进口平面的根部位置不在中心线上,它相对于中心线的距离很小。如果将图1中的风扇进口平面沿中心线向上游拉伸一段距离得到新的进口计算域,并将其上下表面设置为滑移边界条件,可以使计算模型更准确。但考虑到上述计算模型的变化对本文研究结果影响较小,而且受限于本研究使用的网格划分软件,所以本研究最终选择了如图1所示的计算模型。

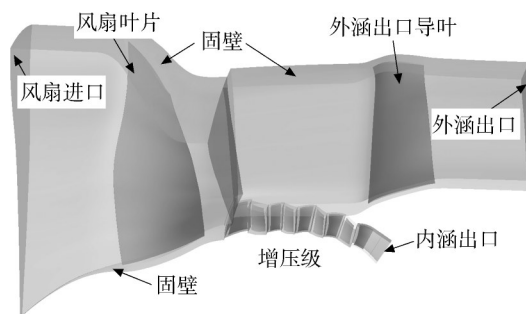


图1 计算模型图示

Fig.1 Diagram of the calculation model

1.2 网格和计算设置

根据本单位标准设计流程中的工作指导书给定的原则,使用 AutoGrid v5 对风扇增压级的所有叶片排进行网格划分,具体网格设置与文献[21]保持一致,网格拓扑结构采用 O4H 型,风扇、外涵以及内涵的径向网格点数分别为 185、113 和 81。风扇叶片的 B2B 平面网格点数如图2所示,分流环采用 C 型网格拓扑结构,设置如图3所示。风扇叶片和增压级动叶叶尖间隙分别为 1.0 mm 和 0.5 mm,间隙网格径向点数都取 17。壁面第一层网格宽度取为 0.05 mm,使 $y^+ \leq 10$ 。计算使用收

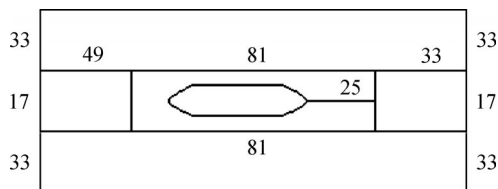


图2 风扇B2B平面网格设置

Fig.2 Fan blade B2B mesh topology

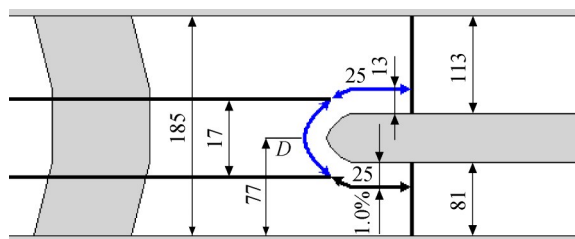


图3 分流环网格设置

Fig.3 Mesh topology near the splitter

敛性优秀的S-A(Spalart-Allmaras)湍流模型。

数值计算设置与文献[21]中的计算设置保持一致:工质选用真实空气;进口给标况下的总压、总温和轴向来流方向,双涵出口分别给平均静压;固壁给绝热无滑移边界条件;采用混合平面法处理各叶片排的动静交界面。

计算收敛准则见文献[21]。事实上,采用非定常数值计算方法可以更准确地计算风扇增压级的内外涵特性曲线。但考虑到计算方案较多,所以本文最终采用经过校核的定常数值计算方法开展研究。

1.3 数值计算结果验证

不同网格数对内外涵气动性能(总压比和效率)的影响见文献[21],验证了网格独立性。为了在数值计算中兼顾准确性和时间,最终选择了937万的风扇增压级网格总量。

作者已在文献[21]中针对相同的计算设置,对比了带进口导叶S0的四级缩尺增压级模型的计算和试验结果,计算和试验得到的增压级总压比随流量的变化特性吻合较好,且计算和试验得到的各排静叶进口总压径向分布吻合较好,由此可以验证计算方法的可靠性。

1.4 变外涵工况方案

本文在设计转速下,依次固定外涵工况为近堵点、工作点、中间点和近端点(即不同外涵工况方案),改变内涵出口静压,得到风扇增压级特性曲线,在此过程中,着重考察外涵气动性能的变化规律、外涵工况对内涵特性的影响规律,阐明双涵

匹配机理。

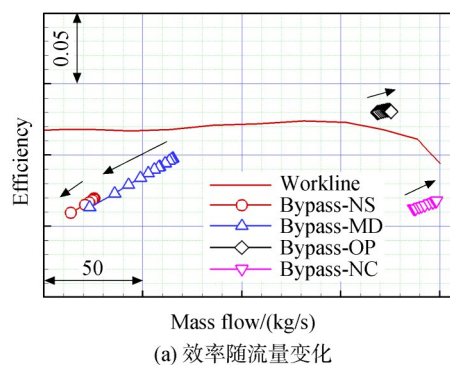
需要注意的是,设计转速下的工作点是指特性线与空中共同工作线的交点,中间点指介于近端点和工作点之间的工况,本研究以外涵流量高于近端点外涵流量约40 kg/s的工况作为中间点,该工况与近端点更接近。

下一节将对变外涵工况下风扇增压级计算结果进行分析。

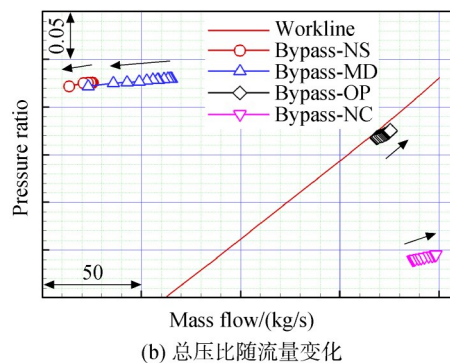
2 风扇增压级计算结果分析

2.1 内外涵气动特性

图4给出了风扇增压级的外涵特性线,图中NS、MD、OP和NC分别表示外涵工况为近端点、中间点、工作点以及近堵点的情况。由图可知,在100%转速下,当外涵工况固定为近堵点或工作点时,随着内涵逼喘,外涵流量和总压比逐渐增大,效率也有一定的变化;当外涵工况固定为中间点或近端点时,随着内涵逼喘,外涵流量会逐渐下降,总压比和效率也会逐渐减小。因此,在内涵逼喘的过程中,不同外涵工况下,外涵呈现“近堵更堵、近喘更喘”的流量变化规律,即近堵点流量变大,近喘点流量变小。



(a) 效率随流量变化



(b) 总压比随流量变化

图4 外涵特性曲线

Fig.4 Characteristic curves of the bypass

考虑到内涵逼喘时,外涵固定于近堵点或工作点时的气动性能变化趋势相近,固定于中间点或近喘点时的性能变化规律相似。因此,后面小节将着重针对外涵工况是工作点和中间点的流场开展详细分析。

本文内涵稳定裕度的定义为

$$S = \left(\frac{\pi_{NS}}{\pi_{OP}} \cdot \frac{\dot{m}_{OP}}{\dot{m}_{NS}} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中 π_{OP} 和 π_{NS} 分别为内涵工作点和近喘点的总压比; $\dot{m}_{OP}$ 和 $\dot{m}_{NS}$ 分别为内涵工作点和近喘点的质量流量。将外涵工况为工作点时的内涵稳定裕度作为参考基准 S_{ref} , 以 S/S_{ref} 表征各外涵工况下的无量纲内涵稳定裕度。

图5给出了风扇增压级的内涵特性线。由图可知,当外涵工况从近堵点开始依次经过工作点和中间点逐渐向近喘点演变时,内涵流量、总压比和效率都呈现增大的变化规律,而且内涵的无量纲稳定裕度分别为0.40、1.00、0.77和0.06。需要特别注意的是,当外涵工况为近喘点时,计算得到内涵裕度特别小,事实上是因为内涵逼喘的过程中,外涵流量下降,导致外涵先进喘。此时数值计算稳定收敛的内涵流量最小工况并非内涵的真实

近喘点,内涵裕度无法通过式(1)评估,后面小节将对不同外涵工况下计算得到的内涵稳定裕度的真实性进行详细考察。当内涵工况是工作点时,外涵工况变化过程中(近堵点到近喘点),内涵流量、总压比和效率分别增大了2.24%、0.53%以及0.85%。

2.2 极限流线和马赫数分布

图6和图7分别给出了风扇叶片和外涵出口导叶在不同外涵工况下,内涵近喘点的吸力面极限流线图,图中LE和TE分别表示前缘和尾缘。

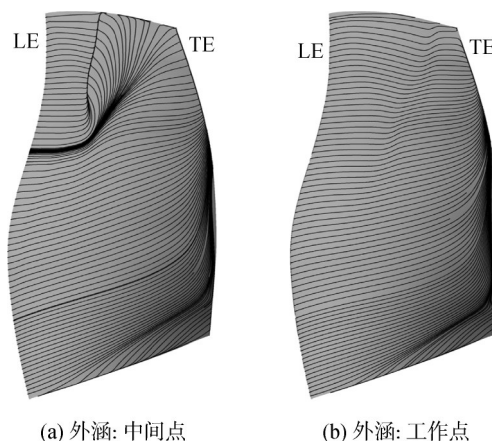


图6 内涵近喘点风扇叶片吸力面极限流线

Fig.6 Suction surface streamlines on fan blades under the near surge condition of the core

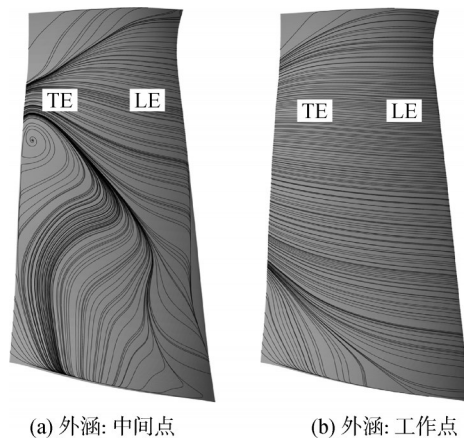
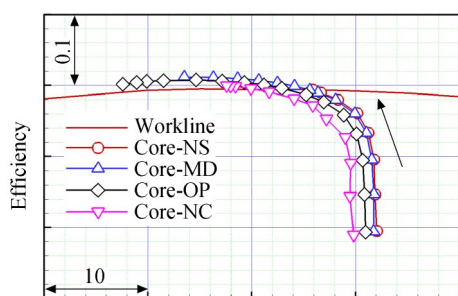
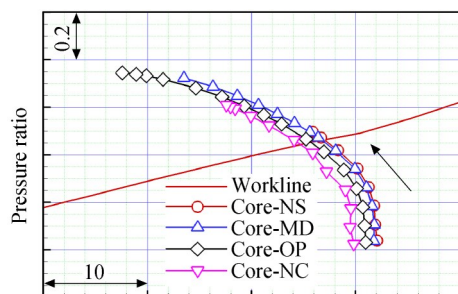


图7 内涵近喘点外涵出口导叶吸力面极限流线

Fig.7 Suction surface streamlines on bypass outlet guide vanes under the near surge condition of the core



(a) 效率随流量变化



(b) 总压比随流量变化

图5 内涵特性曲线

Fig.5 Characteristic curves of the core

由图6可知,当外涵工况为中间点时,风扇近叶尖区域的流动存在明显的径向迁移,激波后有明显的流动分离;当外涵工况为工作点时,风扇叶片吸力面不存在明显的分离区,这表明风扇在设计转速的工作点经过良好的流场优化设计。

图 7 表明了当外涵工况为中间点时,内涵近端点的外涵出口导叶吸力面上两个角区流动严重分离,叶片临近失速,这是因为内涵逼喘导致外涵出口导叶流动恶化,以致外涵先进喘,所以在该外涵工况下计算得到的内涵裕度(无量纲值为 0.77)并非真实的内涵裕度;当外涵工况为工作点时,外涵出口导叶角区流动分离程度较低,在该外涵工况下的内涵裕度(无量纲值为 1.00)是真实的内涵裕度。

图 8 给出了外涵工况为中间点和工作点时风扇 95% 叶高的等熵马赫数分布,图中虚线和实线分别表示内涵的近端点和工作点。等熵马赫数定义为

$$Ma_{is} = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{p_{t0}}{p} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]} \quad (2)$$

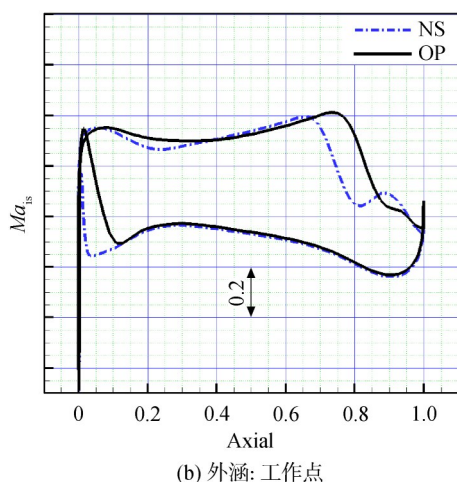
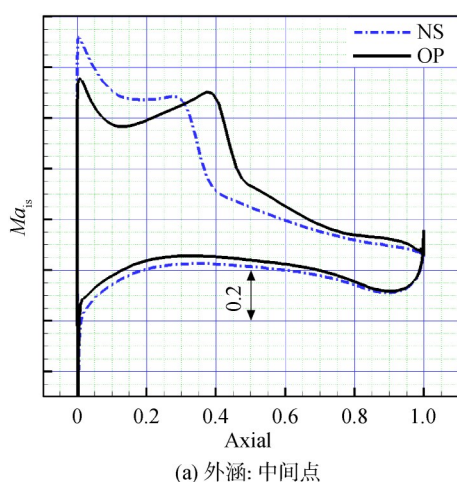


图 8 风扇 95% 叶高等熵马赫数分布

Fig.8 Distribution of isentropic Mach number at 95% fan blade span

式中 p_{t0} 表示进口总压, p 表示当地静压, κ 表示绝热常数。

由图可知,无论外涵处于哪个工况,内涵逼喘时,风扇 95% 叶高的等熵马赫数分布存在明显变化,激波向进口方向移动。

图 9 给出了外涵工况为中间点时风扇 95% 叶高的相对马赫数分布。图中 Ma_{rel} 表示相对马赫数,定义为气流相对速度与声速的比值。由图可知,激波和叶片吸力面交汇处的激波-附面层干涉作用使激波后的流动发生分离。内涵逼喘时,激波向进口方向移动,激波后流动分离更严重。

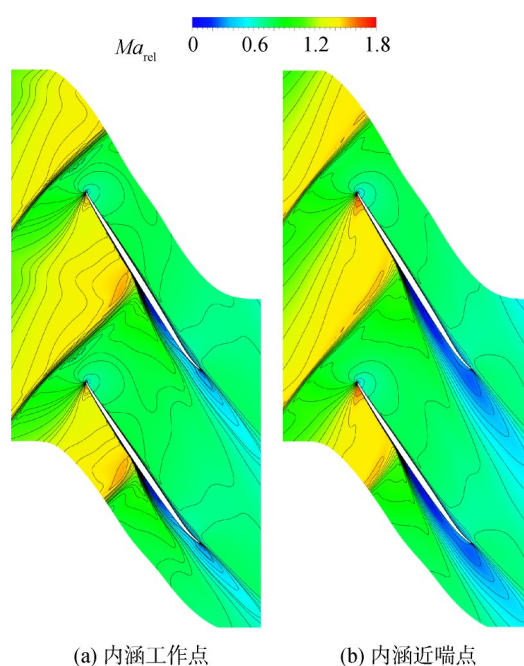


图 9 风扇 95% 叶高 Ma_{rel} 分布(外涵:中间点)

Fig.9 Contours of Ma_{rel} at 95% fan blade span (bypass:middle point)

图 10 给出了外涵工况为工作点时风扇 95% 叶高的相对马赫数分布。由图可知,叶片吸力面在激波后没有明显的流动分离。内涵特性工作点下,可以看出前缘弓形激波和通道激波相互干涉形成的“λ”型激波结构。内涵逼喘时,通道激波向进口方向移动,直至激波与叶片压力面的交点移到叶片前缘,“λ”型激波结构消失,弓形激波与通道激波相互作用形成新的激波结构。

2.3 气动参数径向分布

本小节考察外涵固定在不同工况时,内涵逼喘过程中风扇进口、出口气动参数径向分布的变化规律,以便于进一步理解内涵逼喘对风扇的影响。

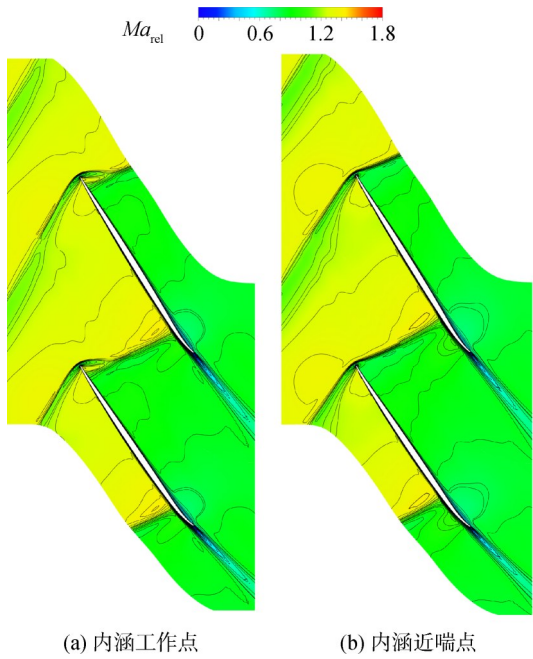


图 10 风扇 95% 叶高 Ma_{rel} 分布 (外涵: 工作点)
Fig.10 Contours of Ma_{rel} at 95% fan blade span
(bypass:operation point)

图 11 和图 12 分别给出了外涵工况为中间点和工作点时风扇进口和出口的气动参数径向分布,主要包括静压、子午速度和径向速度,NS 和 OP 分别表示内涵近喘点和工作点,in 和 out 分别表示风扇进口和出口。

无量纲静压定义为当地静压与风扇进口总压的比值。由图 11 可知,外涵工况为中间点时,内涵逼喘使进口静压和出口静压在全叶高范围内增大,进、出口子午速度都减小;14%~40% 叶高范围内出口径向速度有一定增大。

由图 12 可知,外涵工况为工作点时,内涵逼喘使进口静压和出口静压在全叶高范围内增大,进、出口子午速度都减小,50% 以下叶高范围内

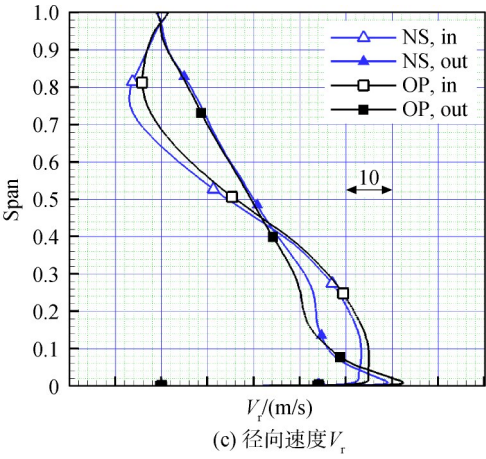
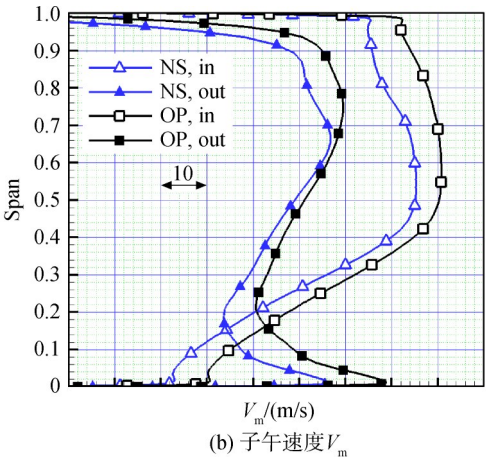
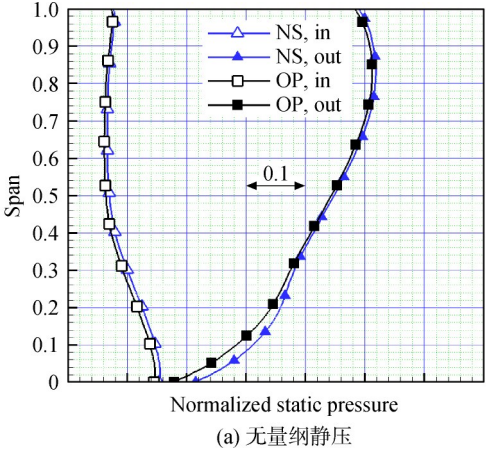
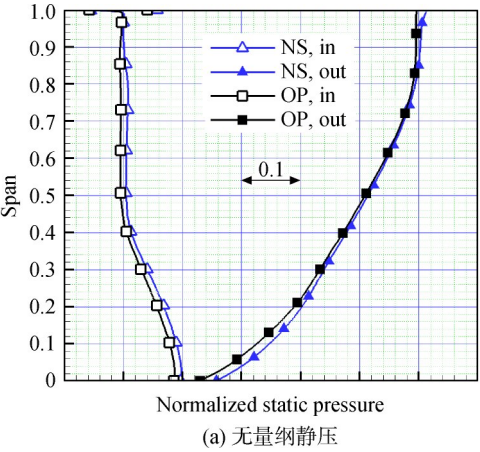


图 11 风扇进口和出口气动参数径向分布 (外涵: 中间点)
Fig.11 Radial distributions of aerodynamic parameters
at the inlet and outlet planes of the fan
(bypass:middle point)

的出口子午速度变化明显;10% 以上叶高范围内出口径向速度有一定增大。

综上所述可以得到以下结论:外涵无论在哪个工况,内涵出口静压增大(内涵逼喘)都会引起风扇



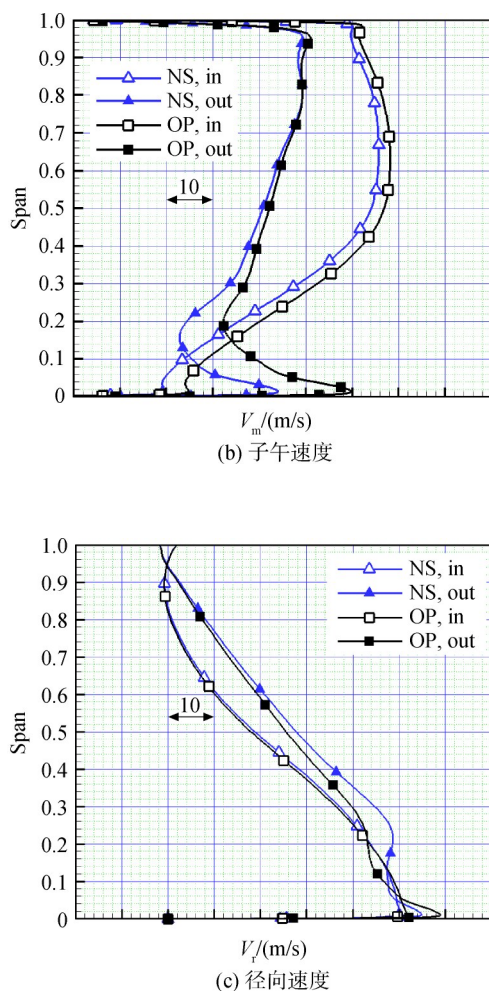


图 12 风扇进口和出口气动参数径向分布(外涵:工作点)
Fig.12 Radial distributions of aerodynamic parameters at inlet and outlet planes of the fan (bypass:operation point)

全叶高出口静压增大,进、出口子午速度下降,此时风扇工作状态离近喘点更近。而且,风扇叶根出口的静压增幅比叶中出口更大,所以局部径向压力梯度减小,使气流径向速度增大。

3 双涵匹配机理分析

3.1 风扇气动特性分析

由文中第 2.1 节的计算结果可知,内涵喘喘时,外涵呈现“近堵更堵、近喘更喘”的流量变化规律。无论外涵固定于哪个工况,内涵喘喘(内涵出口静压增大)会引起风扇出口静压增大、进口流量减小,差别在于变化幅度的大小,因此内涵喘喘会导致风扇喘喘,使风扇的工作状态向近喘点移动。

图 13 给出了分别固定外涵工况为近喘点、中间点、工作点和近堵点时,改变内涵出口静压获取

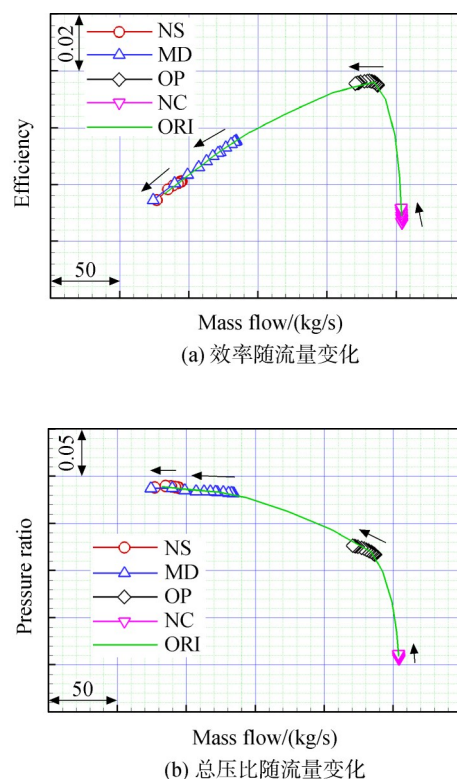


图 13 风扇特性曲线
Fig.13 Characteristic curves of the fan

的风扇特性曲线,图中 NS、MD、OP 和 NC 分别表示外涵工况为近喘点、中间点、工作点以及近堵点的情况,ORI 表示内涵工况为工作点时,改变外涵出口静压获取的风扇特性曲线。由图可知,随着内涵喘喘,风扇流量都会逐渐降低,外涵工况不同会影响风扇流量的降低幅度。当外涵工况为中间点、工作点和近堵点时,以内涵工作点的风扇流量为基准,内涵喘喘引起风扇流量分别降低了 4.31%、1.12% 和 0.04%。

由图 13(b) 可知,外涵工况移向近喘点会使风扇总压比增大,由于压力的径向平衡作用,在全叶高范围内风扇出口总压增大,引起增压级进口总压增大。由于增压级出口静压是固定不变的,所以它的工作状态会离近喘点更近,最终使内涵稳定裕度增大。这也是图 5 中内涵稳定裕度随外涵工况移向近喘点呈现先增大的变化规律的原因,但是内涵稳定裕度随后呈现下降趋势的原因在于外涵先进喘引起的计算发散。因此,可以认为计算得到的内涵稳定裕度最大值对应的外涵工况是一个临界工况,在该工况下,内涵喘喘使内涵、外涵同时进喘。当外涵工况继续移向近喘点时,外涵流量小于临界工况流量,计算得到的内涵

稳定裕度不再是真实的内涵裕度,此时真实的内涵裕度仍然会持续增大。

内涵从工作点向近喘点的逼喘过程中,记风扇流量和内涵流量的变化量分别为 $\Delta\dot{m}_f$ 和 $\Delta\dot{m}_c$, $|\Delta\dot{m}_f/\Delta\dot{m}_c|$ 可以作为风扇性能受影响程度的衡量指标。当外涵分别固定于近堵点、工作点、中间点和近喘点时, $|\Delta\dot{m}_f/\Delta\dot{m}_c|$ 分别为0.08、0.78、3.75和10.27。因此,可以明显发现内涵逼喘时,如果外涵在近堵点附近,风扇流量降幅较小,如果外涵在近喘点附近,风扇流量降幅较大。如果以风扇下降单位流量时的总压比变化幅度来衡量风扇总压比变化大小,可以直接根据风扇总压比-流量特性线的斜率来判断:外涵工况在近堵点附近时,内涵逼喘导致总压比变化较大,外涵工况在近喘点附近时,内涵逼喘导致总压比变化较小。

上述变化规律由风扇的气动特性所决定:当外涵工况在近喘点附近时,风扇的总压比-流量特性线较平缓,改变风扇出口静压引起了较小的总压比和较大的流量变化;当外涵工况在近堵点附近时,风扇的总压比-流量特性线较陡峭,改变风扇出口静压引起了较大的总压比变化和较小的流量变化。

在内涵逼喘的过程中,还能通过风扇流量变化量和内涵流量变化量的比值 $|\Delta\dot{m}_f/\Delta\dot{m}_c|$ 是否小于1来判断外涵流量是否增加。因此,会存在一个特殊的外涵工况,使 $|\Delta\dot{m}_f/\Delta\dot{m}_c|=1$,此时,随着内涵逼喘,外涵流量几乎不会改变。

为了进一步探寻在内涵逼喘过程中使内外涵同时进喘的外涵工况以及使外涵流量几乎保持不变的外涵工况,在外涵中间点和工作点之间的工况范围内,额外开展多个方案的数值计算。图14给出了无量纲内涵裕度 S/S_{ref} 和风扇、内涵的流量变化量比值 $|\Delta\dot{m}_f/\Delta\dot{m}_c|$ 随外涵流量的变化曲线。图中横坐标表示内涵工况为工作点时,不同外涵工况下的外涵流量。

由图14可知,当外涵在临界工况A时,无量纲内涵稳定裕度达到最大值1.04,外涵流量低于工作点流量约50 kg/s,在该临界工况下,内涵逼喘会使内涵、外涵同时进喘。当外涵在工况B时, $|\Delta\dot{m}_f/\Delta\dot{m}_c|$ 等于1,外涵流量低于工作点流量约20 kg/s,在该工况下,内涵从工作点向近喘点的逼喘过程中,外涵流量几乎不会变化。

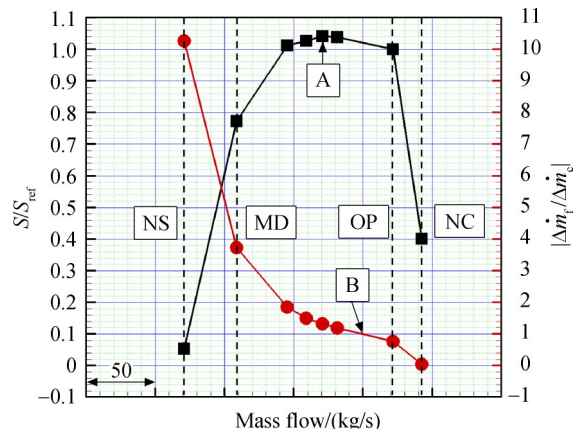


图14 无量纲内涵裕度和 $|\Delta\dot{m}_f/\Delta\dot{m}_c|$ 随外涵流量变化曲线

Fig.14 Variation of normalized core surge margin and $|\Delta\dot{m}_f/\Delta\dot{m}_c|$ with bypass mass flow

3.2 分流环前缘流动分析

图15~图17分别给出了外涵工况为中间点、工作点和近堵点时,子午面内分流环附近相对马赫数云图,分流环前缘的驻点位置附近存在局部低速区,驻点前流线即为内涵与外涵的分隔线,分隔线以下和以上的气流分别流向内涵和外涵。由图可知,无论外涵是哪个工况,内涵从工作点移向

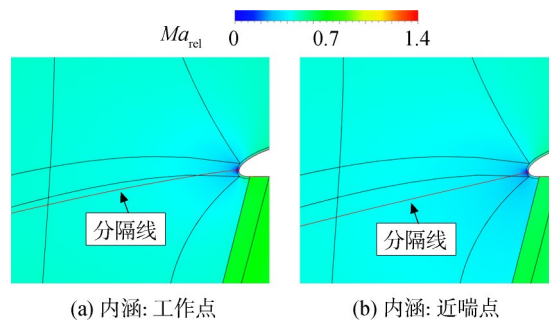


图15 分流环相对马赫数云图(外涵:中间点)

Fig.15 Relative Mach number contours near the splitter (bypass:middle point)

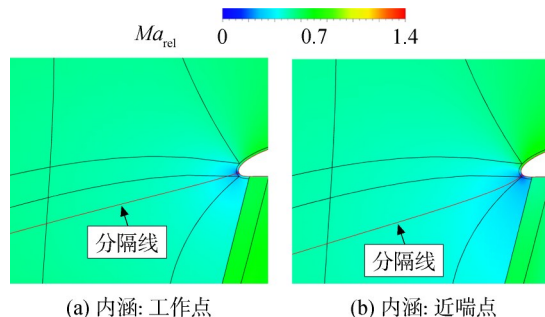


图16 分流环相对马赫数云图(外涵:工作点)

Fig.16 Relative Mach number contours near the splitter (bypass:operation point)

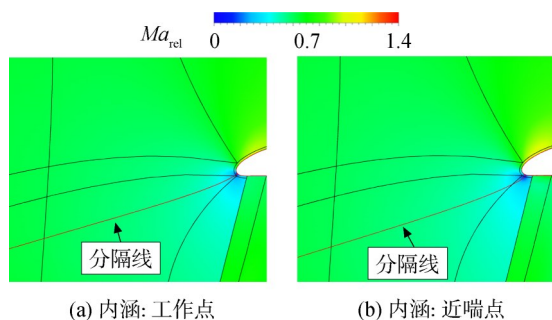


图 17 分流环相对马赫数云图(外涵:近堵点)

Fig.17 Relative Mach number contours near the splitter
(bypass:near choke point)

近喘点的逼喘过程中,分流环前缘驻点位置下移,分隔线与轴向夹角增大,即分流环前缘感受到的攻角增大,有更大径向范围内的气流会流向外涵。

根据前文图 11 和图 12 的分析可知,分流环前来流的子午速度减小,径向速度增大,从而造成了分流环前来流攻角增大。本质上而言,引起分流环附近流场变化的原因是内涵出口静压变化的

过程中,风扇出口静压及其径向分布的变化引起的内外涵流量再分配。

在风扇出口位置,计算各个工况下分隔线所在的相对叶高位置,估算内涵从工作点移向近喘点的逼喘过程中,由内外涵分隔线位置变化引起的额外流向外涵的流量,结果如表 1 所示,表中流量都是以内涵工作点的风扇流量为基准进行无量纲化。

由表可知,当外涵工况为中间点、工作点和近堵点时,内涵逼喘导致额外流向外涵的流量分别为 0.56%、0.81% 和 0.41%,另外,内涵逼喘还引起风扇流量分别降低了 4.31%、1.12% 和 0.04%。因此,对于外涵中间点工况,风扇流量降低更明显,最终外涵流量降低;对于外涵近堵点工况,风扇流量降低不明显,因内外涵分隔线变化额外流向外涵的气流导致最终外涵流量增大;对于外涵工作点工况,内涵逼喘过程中,风扇流量和内涵流量的降低量分别为 1.12% 和 1.43%,此时由于内外涵分隔线变化额外流向外涵的气流导致内涵流量降低量更大,最终导致外涵流量增大。

表 1 各工况分隔线位置及内涵逼喘过程的流量变化

Table 1 Locations of dividing lines and variations in mass flow during the forced surge process of the core under different working conditions

外涵工况		中间点	工作点	近堵点
内外涵分隔线相对位置/%	内涵工作点	17.86	16.45	15.35
	内涵近喘点	16.94	15.08	14.71
额外流向外涵流量/%		0.56	0.81	0.41
内涵流量相对变化量/%		-1.15	-1.43	-0.52
外涵流量相对变化量/%		-3.16	0.31	0.48
风扇流量相对变化量/%		-4.31	-1.12	-0.04

3.3 匹配机理总结

根据上述分析可知,内涵逼喘时,双涵气动性能的相互匹配机理,本质上由以下两方面共同决定:①风扇的气动特性;②内外涵流量再分配机制。一方面,外涵工况直接影响了风扇的工作状态,从而决定了内涵逼喘时风扇进口流量的降低幅度以及总压比、效率等气动性能的变化;另一方面,内涵逼喘过程中,风扇出口静压在径向上发生了不同程度的变化,引起了内外涵流量再分配,使更大径向范围内的气流流向外涵,最终两方面的共同作用影响了外涵流量以及其他气动性能的变化。

当外涵工况在近喘点附近时,风扇的总压比-流量特性线较平缓,风扇出口静压改变引起的总压比变化较小,流量变化较大,内涵逼喘导致风扇流量的降低幅度较大,尽管内外涵分隔线与轴向夹角增大使更多叶高范围的气流流入外涵,但最终外涵流量仍然下降。

当外涵工况在近堵点附近时,风扇的总压比-流量特性线较陡峭,风扇出口静压改变引起的总压比变化较大,流量变化较小,内涵逼喘导致风扇流量的降低幅度较小,与此同时,内外涵分隔线与轴向夹角增大使更多叶高范围的气流流入外涵,最终外涵流量增大。

当外涵在工况B时,外涵流量低于工作点流量约20 kg/s,风扇总压比-流量特性和内外涵流量再分配机制对外涵流量的影响达到平衡,此时,内涵从工作点向近喘点的逼喘过程中,外涵流量几乎不会改变。

当外涵在临界工况A时,内涵逼喘会使内涵、外涵同时进喘。对于风扇增压级试验而言,录取内涵性能曲线时,必须保证固定外涵工况后,外涵流量大于临界工况流量,确保内涵逼喘的过程中,外涵不会进喘。

如果为了进一步降低试验过程中的外涵进喘风险,建议将外涵固定在流量大于工况B流量的工况,此时随着内涵逼喘,外涵流量不会减小。

同时,考虑到外涵工况的变化对内涵的总压比、效率、流量以及稳定裕度有显著的影响,建议结合实际飞行中的风扇增压级工作状态,在多个外涵工况下录取内涵的性能曲线。

4 结 论

本文针对某型民机大涵道比风扇增压级,在不同外涵工况下,采用数值计算的方法开展内外涵匹配研究,在双涵匹配规律和匹配机理方面,得到了以下结论:

1) 外涵工况对内涵特性的影响规律:当外涵工况从近堵点移向近喘点的过程中,内涵的流量、总压比和效率逐渐增大,真实的内涵稳定裕度呈持续增大的变化规律。

2) 当内涵工况为工作点时,外涵工况从近堵点移向近喘点的过程中,内涵流量、总压比和效率分别增大了2.24%、0.53%以及0.85%。

3) 外涵存在临界工况,使内涵逼喘过程中,内、外涵同时进喘,外涵流量低于临界工况流量时,内涵逼喘使外涵先进喘,此时真实的内涵裕度大小无法评估。

4) 不同外涵工况下,外涵呈现“近堵更堵,近喘更喘”的流量变化规律。当外涵工况固定为近堵点和工作点时,内涵逼喘使外涵流量增大;当外涵工况固定为中间点和近喘点时,内涵逼喘使外涵流量下降;当外涵固定为流量低于工作点流量约20 kg/s的工况时,外涵流量随着内涵逼喘几乎没有变化。

5) 风扇增压级的双涵匹配机理,本质上取决于风扇的总压比-流量特性和内外涵流量再分配机制两方面。

6) 风扇增压级试验中,建议在多个外涵工况下录取内涵性能曲线,且必须保证外涵流量高于临界工况流量,建议将外涵固定在内涵逼喘过程中外涵流量不会下降的工况。

参考文献:

- [1] 陈懋章,刘宝杰. 风扇/压气机气动设计技术发展趋势——用于大型客机的大涵道比涡扇发动机[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6):961-975.
CHEN Maozhang, LIU Baojie. Fan/compressor aero design trend and challenge on the development of high bypass ratio turbofan[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6):961-975. (in Chinese)
- [2] 陈云永,杨小贺,卫飞飞. 大涵道比风扇设计技术发展趋势[J]. 航空学报, 2017, 38(9):27-34.
CHEN Yunyong, YANG Xiaohe, WEI Feifei, et al. Development trend of high bypass ratio turbofans design technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(9):27-34. (in Chinese)
- [3] RITI S. Fifty years of civil aero gas turbines[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1996, 68(4):3-19.
- [4] DAWES W N. Multi-blade row Navier-Stokes simulations of fan-bypass configurations[R]. ASME Paper 91-GT-148, 1991.
- [5] 赵永辉. 涡扇发动机风扇及内外涵匹配的数值分析[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所, 2005.
ZHAO Yonghui. Numerical analysis on matching between internal and external bypass and fan of aero-engine[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [6] BRILLIANT L, BALAMUCKI S, BUERGER G, et al. Application of multistage CFD analysis to low pressure compressor design[R]. ASME Paper GT2004-54263, 2004.
- [7] ADAMCZYK J J. Aerodynamic analysis of multistage turbomachinery flows in support of aerodynamic design[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122:189-217.
- [8] HORLOCK J H, DENTON J D. A review of some early design practice using computational fluid dynamics and a current perspective[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127: 5-13.
- [9] 李晓娟,金海良,桂幸民. 风扇/增压级内外涵联算的特性数值模拟[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12):2719-2726.
LI Xiaojuan, JIN Hailiang, GUI Xingmin. Performance numerical investigation of double-channel fan/compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(12):2719-2726. (in Chinese)
- [10] 李晓娟,桂幸民. 风扇/增压级设计与非设计性能数值模拟[J]. 推进技术, 2005, 26(6):522-525.
LI Xiaojuan, GUI Xingmin. Numerical simulation of fan/compressor design and off-design performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(6):522-525. (in Chinese)
- [11] 万科,朱芳,金东海,等. 周向平均方法在某风扇/增压级分

- 析中的应用[J].航空学报,2014,35(1):132-140.
- WAN Ke, ZHU Fang, JIN Donghai, et al. Application of circumferentially averaged method in fan/booster[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(1):132-140. (in Chinese)
- [12] 万科, 杨小贺, 丁建国. 风扇/增压级端区流动优化设计研究[J]. 燃气轮机技术, 2018, 31(4):53-58.
- WAN Ke, YANG Xiaohe, DING Jianguo. Optimization design and research of endwall flow in high-bypass-ratio fan/booster[J]. Gas Turbine Technology, 2018, 31(4):53-58. (in Chinese)
- [13] 刘晓锋, 刘世文, 杨小贺, 等. 某大涵道比风扇轮毂型线数值计算[J]. 航空发动机, 2018, 44(4):26-33.
- LIU Xiaofeng, LIU Shiwen, YANG Xiaohe, et al. Numerical calculation of hub-shape contouring on a high bypass ratio engine fan[J]. Aeroengine, 2018, 44(4):26-33. (in Chinese)
- [14] 丁建国, 胡骏. 某掠形跨声风扇设计与数值模拟[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1):54-59.
- DING Jianguo, HU Jun. Design and numerical simulation of a transonic swept fan[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1):54-59. (in Chinese)
- [15] 赵威程. 大涵道比风扇、增压级三维设计及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- ZHAO Weicheng. The three-dimensional design and performance investigation on high bypass ratio fan and booster[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [16] 李晓娟, 桂幸民. 风扇/增压级带间隙三维粘性流场数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1):4-7.
- LI Xiaojuan, GUI Xingmin. Numerical simulation of three dimension viscous flow of fan/compressor with tip clearance [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(1):4-7. (in Chinese)
- [17] 陈云永, 万科, 杨小贺, 等. 大涵道比风扇/增压级叶尖间隙影响研究[J]. 航空学报, 2017, 38(9):190-197.
- CHEN Yunyong, WAN Ke, YANG Xiaohe, et al. Influence of tip clearance on high-bypass-ratio fan/booster[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(9):190-197. (in Chinese)
- [18] 顾明浩, 桂幸民. 低雷诺数效应对某型风扇的性能影响及改进方案研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4):438-443.
- GU Minghao, GUI Xingmin. Low-Re number effects on the performance of some fans and the modified design[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4):438-443. (in Chinese)
- [19] 桂幸民, 李晓娟. 基于低雷诺数条件的风扇/增压级气动设计[J]. 燃气轮机试验与研究, 2007, 20(3):18-22.
- GUI Xingmin, LI Xiaojuan. Aerodynamic design of fan/compressor operated at low Reynolds number[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(3):18-22. (in Chinese)
- [20] 朱芳, 陈云永, 卫飞飞, 等. 某民用大涵道比涡扇发动机风扇缩尺试验件气动性能数值仿真[J]. 航空动力学报, 2013, 28(7):1539-1548.
- ZHU Fang, CHEN Yunyong, WEI Feifei, et al. Numerical simulation of aerodynamic performance of scaled fan of a civil high-bypass-ratio turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(7):1539-1548. (in Chinese)
- [21] 郑覃, 杨小贺, 叶俊, 等. 内涵工况对风扇增压级双涵匹配的影响[J]. 航空学报, 2022, 43(7):184-199.
- ZHENG Tan, YANG Xiaohe, YE Jun, et al. Influence of various core working conditions on twin-duct matching in fan booster[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7):184-199. (in Chinese)

(编辑:张 雪)