

压气机中介机匣全流量工况特性的数值研究^{*}

赵 磊^{1,2}, 刘钺韬^{1,2}, 高丽敏^{1,2}, 邓卫敏^{1,2}

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学 翼型、叶栅空气动力学国家级重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为全面评价压气机中介机匣性能, 从上下游匹配角度, 定义了中介机匣节流特性, 从流动损失、出口畸变和流量阻塞三个方面, 在全流量工况范围内评估中介机匣的性能, 并给出了相应性能参数表达式。在均匀和实际不均匀总压入口条件下, 对小型涡扇发动机压气机中介机匣流场进行数值计算, 获取其全流量工况性能参数, 并分析其流动机理。计算结果表明: 中介机匣的出口总压损失和总压畸变程度随流量增加而增加; 在实际不均匀进气条件下, 流动损失和畸变程度均大于均匀进气条件; 当中介机匣的设计流量和最大流量接近时, 会造成压气机和中介机匣共同工作的阻塞流量明显减少。因此, 对中介机匣进行性能评价时应考虑到实际的入口条件和非设计点的影响, 在设计和选配中介机匣时应保证足够的流量裕度。

关键词: 压气机; 中介机匣; 节流特性; 进气畸变; 流动损失; 流量阻塞

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2021) 11-2438-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200106

Numerical Study on Characteristics of Compressor Intermediate Duct Within Full Mass Flow Working Condition

ZHAO Lei^{1,2}, LIU Tan-tao^{1,2}, GAO Li-min^{1,2}, DENG Wei-min^{1,2}

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To evacuate the performance of the compressor intermediate duct (CID) comprehensively, the throttle characteristic was defined from the perspectives of the upstream and downstream matching. It was proposed that the performance of CID should be evacuated from three aspects, which are flow loss, outlet distortion and flow blockage, within the range of full mass flow working conditions. The corresponding evacuating expressions were deduced. To acquire the performance parameters and flow mechanism of full mass flow working conditions, CID flow fields of a small turbofan engine were calculated by numerical methods in uniform and actual non-uniform total pressure distribution conditions. The results show that the flow loss and the outlet distortion increase with the mass flow. In the actual non-uniform inlet condition, the flow loss and the outlet distortion are much higher than those in uniform inlet condition. When the design mass flow is close to the maximum value of the CID, the choking mass flow of co-working between the CID and the compressor decreases obviously. It can be concluded that the actual inlet condition and off-design points should be considered during evaluating CIDs

^{*} 收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-05-08。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51790512); 引智计划 (B17037); 民机专项科研项目。

作者简介: 赵 磊, 博士, 讲师, 研究领域为航空流体机械内流仿真和高性能并行计算。

通讯作者: 高丽敏, 博士, 教授, 研究领域为叶轮机械气动热力学。

引用格式: 赵 磊, 刘钺韬, 高丽敏, 等. 压气机中介机匣全流量工况特性的数值研究[J]. 推进技术, 2021, 42(11):2438-2444. (ZHAO Lei, LIU Tan-tao, GAO Li-min, et al. Numerical Study on Characteristics of Compressor Intermediate Duct Within Full Mass Flow Working Condition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(11):2438-2444.)

and sufficient flow margin should be ensured during designing or matching CIDs.

Key words: Compressor; Intermediate duct; Throttle characteristic; Inlet distortion; Flow loss; Flow blockage

1 引言

为了提高运行经济性,涡扇发动机的涵道比不断增大,低压风扇/压气机与高压压气机半径落差随之增加,且轴向尺寸不断缩短,这使得压气机中介机匣(Compressor intermediate duct, CID)呈现典型的“S”型环形管道。气流的大角度折转和支板的干扰使中介机匣内的流动复杂化,再加上低压风扇/压气机实际出口气流的不均匀,中介机匣已经成为进一步挖掘涡扇航空发动机潜力的重要流通部件。

Britchford等^[1]和Bailey等^[2-3]较早开展了中介机匣的实验与数值研究,探讨了常规径向落差比下壁面曲率、支板以及来流条件对总压损失的影响。Duenãs等^[4]在对三种长度的无支板中介机匣流场测量后,发现弯曲的中介机匣流动损失远大于同等逆压梯度环境下的平板流动。由于发动机结构限制,流道中存在支板,支板的数量、相对厚度和弦长的增加均会造成流动损失的增加^[5-6]。支板-轮毂角区分离^[7-8]和二次流动^[9]的加剧是造成损失增加的主要原因。李斌等^[10]的实验研究表明支板的掠构型也会影响流动损失。

中介机匣性能同时受到入口条件影响,来流预旋角、马赫数、总压分布均会影响总压损失^[11-12]。高丽敏等^[13]的数值研究表明,中介机匣入口气流的非均匀总压分布会明显影响出口截面总压分布,其中轮毂侧低总压区能抑制支板角区分离,减小损失和畸变。

在设计方面,中介机匣普遍追求长度更短,总压损失更小,为此多采取两步优化方法^[14]。邓小明、冯旭栋等^[15-16]使用优化算法首先构造出性能较优的二维构型,以此作为初值,再进行三维优化。Stürzebecher等^[17]首先优化长度,然后再使用第一步的结果进一步优化总压恢复系数。

在中介机匣设计、流动机理等方面已开展了大量的研究,并取得了一些成果,但大部分研究工作主要关注设计工况的总压损失。本文将从发动机运行的实际出发,考虑到中介机匣与上游风扇及下游压气机的匹配,从总压损失和出口畸变两个角度提出中介机匣节流特性,从流通能力角度,提出中介机匣流量裕度,并对某涡扇发动机的中介机匣进行全面

的性能评估,本研究可为涡扇发动机各部件的性能匹配提供依据。

2 节流特性参数定义及数值方法

2.1 性能参数

总压恢复系数 δ 表征了气流通过中介机匣后总压流动损失的相对大小,是最常用的中介机匣性能参数,表达式为

$$\delta = \frac{P_{t,out}}{P_{t,in}} \quad (1)$$

实际工作状态下,中介机匣进出口气流参数均为不均匀分布。典型中介机匣进口总压 p_t 的径向分布见图1,总压畸变区主要分布在机匣和轮毂附近。借鉴俄罗斯径向总压畸变指数的定义,提出了中介机匣径向总压畸变指数 $\Delta\bar{\sigma}_{pt}$,用以表征中介机匣进口/出口截面流场的不均匀程度,定义为轮毂/机匣的局部总压畸变指数 $\Delta\bar{\sigma}_{pt,i}$ 的加权平均,即

$$\Delta\bar{\sigma}_{pt} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta\bar{\sigma}_{pt,i} f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (2)$$

式中 $i=1$ 代表机匣附近, $i=2$ 代表轮毂附近, f_i 为低总压区的无量纲面积,表达式为

$$f_i = (\bar{r}_{e,i}^2 - \bar{r}_{b,i}^2) / (\bar{r}_s^2 - \bar{r}_h^2) \quad (3)$$

式中 $\bar{r}_{b,i}$ 和 $\bar{r}_{e,i}$ 为低总压区起始和结束位置的相对半径; $\bar{r}_s$ 和 $\bar{r}_h$ 分别为机匣和轮毂的相对半径,相对半径 $\bar{r} = r/r_s$, r_s 为机匣半径, $\Delta\bar{\sigma}_{pt,i}$ 表达式为

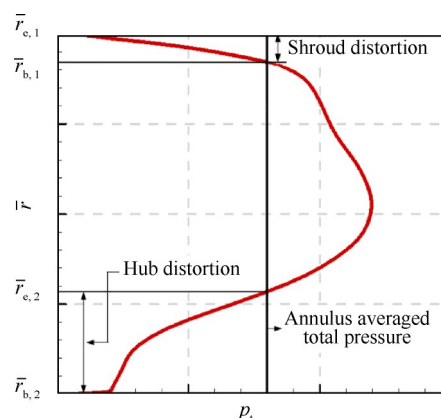


Fig. 1 Distortion zones of annulus averaged total pressure distribution

$$\Delta \bar{\sigma}_{pt,i} = \frac{\int_{\bar{r}_{b,i}}^{\bar{r}_{e,i}} 2 \left(1 - \frac{p_t(\bar{r})}{p_{t,av}} \right) \bar{r} d\bar{r}}{\bar{r}_{e,i}^2 - \bar{r}_{b,i}^2} \quad (4)$$

式中 $p_t(\bar{r})$ 为相对半径处的圆周平均总压, $p_{t,av}$ 为截面平均总压。

2.2 节流特性

航空发动机实际运行工况的变化, 会改变进入到中介机匣气体流量。考虑中介机匣的性能受到上游风扇/压气机运行工况的影响及中介机匣与下游压气机之间的性能匹配, 提出中介机匣节流特性, 以综合评价中介机匣在全流量工况的性能表现情况。

中介机匣节流特性定义为在给定来流条件下, 总压损失和出口流场品质随中介机匣流量的变化关系, 即包含了总压恢复特性和出口畸变特性。

总压恢复特性表征上游风扇/压气机对中介机匣气动性能的影响, 即

$$\delta = f(\dot{m}) \quad (5)$$

通过出口畸变特性, 反映中介机匣出口截面流场不均匀程度在全流量范围的变化, 为与下游压气机匹配提供参考, 有

$$\Delta \bar{\sigma}_{pt} = g(\dot{m}) \quad (6)$$

作为管道流动, 环形的 S 弯中介机匣的通流能力受到阻塞流量的限制, 这也决定了进入发动机核心部件的最大流量。因此, 提出了中介机匣的阻塞流量裕度 M , 以表示中介机匣设计点流量与最大通流能力的距离, 定义为

$$M = \left(\frac{\dot{m}_m}{\dot{m}_d} - 1 \right) \times 100\% \quad (7)$$

式中 $\dot{m}_m$ 和 $\dot{m}_d$ 分别为中介机匣的最大通流能力和设计流量。

2.3 几何模型

本文计算采用的某小型涡扇发动机中介机匣模型与文献[13]相同, 相比于中介机匣实物, 计算中介机匣模型进出口均连接一段延伸段, 计算几何模型如图2所示。中介机匣周向有4个相同的径向安装角为 10° 的支板, 其前缘距中介机匣入口为约20%中介机匣轴向长度, 全流道设计流量为 14.44 kg/s 。

2.4 数值方法与验证

综合考虑计算量和对壁面约束流动的计算效果, 并结合本课题组对中介机匣近十年的研究基础[5,6,11-13], 流场计算采用了 Spalart-Allmaras 湍流模型, 数值方法参见文献[13]。流场具有周期性, 故选取 1/4 通道进行流场计算, 采用 O4H 型网格拓扑结

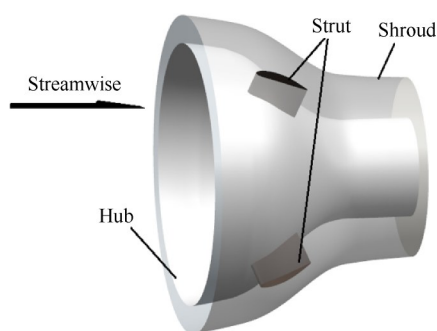


Fig. 2 Illustration of the CID

构, 壁面第一层网格厚度为 $10 \mu\text{m}$, 支板前缘 y^+ 为 6 左右, 其它壁面 y^+ 为 4 左右。网格数量约 120 万时, 达到网格无关性要求。图3显示了计算域边界条件设置和网格划分。

对 2.3 节中介机匣在均匀进气条件下进行流场数值计算, 出口边界条件给定设计流量, 收敛误差设为 10^{-6} 。计算结果与中介机匣的部件实验结果比对如图4所示, $\bar{h}$ 和 $\bar{p}_t$ 分别为无量纲流道高度和无量纲总压。可见, 在进气隔离段后的实际中介机匣的进口截面, 图4(a), 主流区总压沿径向分布较为基本均匀; 由于流道曲率以及支板作用, 在出口截面, 见图4(b), 总压沿径向存在畸变现象: 机匣附近附面层较进口截面有一定增长; 由于支板和轮毂角区的影响, 靠近轮毂 40% 处, 存在较大的低总压区。但总体来看, 在进口和出口截面, 计算结果与实验数据均较好吻合, 这表明选用的数值方法准确可靠。

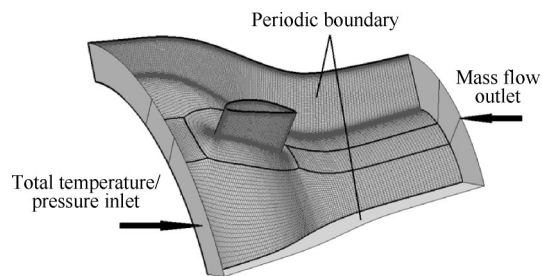


Fig. 3 Illustration of boundary conditions and the mesh

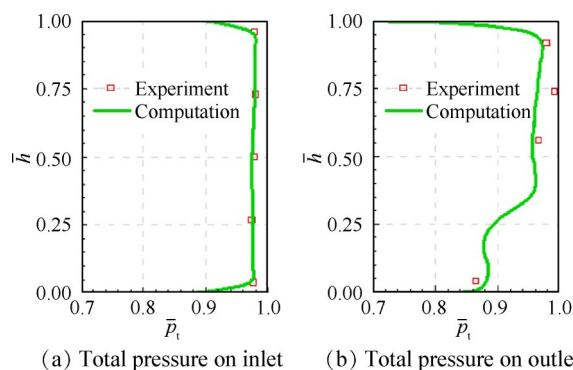


Fig. 4 Comparison of the experiment and the computation

2.5 计算方案

中介机匣的设计通常默认进口来流沿径向均匀分布,但文献[2]和[11]表明,入口来流条件会对中介机匣流场产生较大影响,故采用了总压均匀分布和按上游出口的实际总压径向分布两种进气条件。计算中介机匣全流量工况特性,如图5所示。实际非均匀总压分布数据来源于该型压气机实验测量结果,在径向上,总压呈现主流区高,两壁面附近低,且轮毂区域低总压范围较大。这主要是因为由于上游转子轮毂区增压能力弱、角区边界层分离、机匣叶顶泄漏流等因素引起。两入口条件,总压的面积平均值相等。本文的研究范围内,没有考虑来流预旋角的影响。

两种入口条件下,均先对设计点流量进行计算,然后通过改变出口流量,对中介机匣的全流量范围进行计算。同时,为研究中介机匣对压气机堵塞流量的影响,计算了中介机匣下游压气机单独工作和与中介机匣共同工作时的特性线。

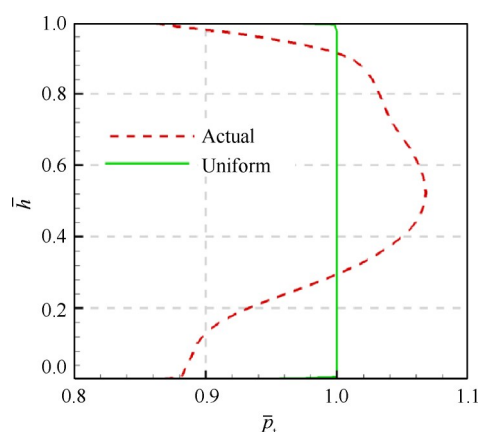


Fig. 5 Inlet condition of CID

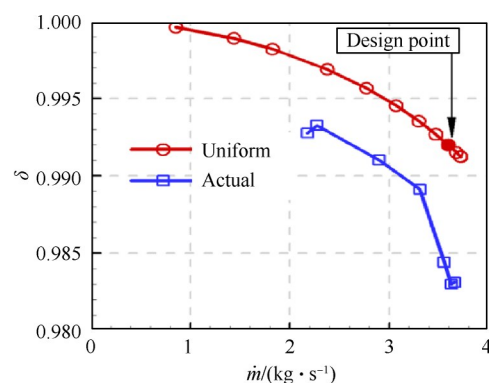
计算过程中,求解器根据边界条件调节出口背压,当减小背压而流量不再增加时,即达到中介机匣的最大流量,此时气流在喉道截面达到声速,形成堵塞,致使流量不能进一步增加,达到最大值;当流量减小,直至计算发散,在发散前,计算可收敛的流量为最小流量。

3 中介机匣特性及流场分析

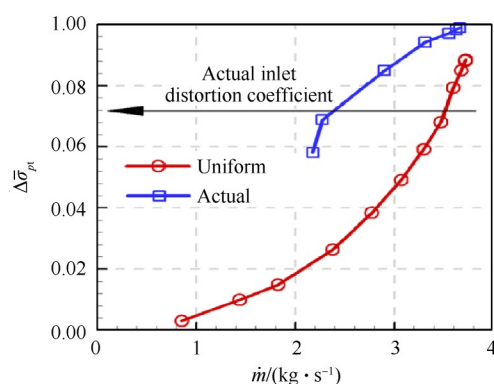
3.1 中介机匣全流量范围性能分析

图6(a)给出了均匀进气和实际进气条件下总压恢复系数随流量的变化。可以看出,当流量逐渐增大时,无论均匀进气还是实际进气,中介机匣的总压恢复系数均逐渐减小。但是,在均匀进气条件下中

介机匣流动损失相对较小,总压恢复系数都保持在了0.99以上;而实际进气条件下的中介机匣总压恢复系数小于相近流量的均匀进气状态,这是因为不均匀的径向来流总压分布增加了径向的掺混,掺混损失增大。



(a) Schematic of total pressure coefficients with mass flow



(b) Schematic of distortion coefficients with mass flow

Fig. 6 Characteristic maps of CID

从流量上看,实际进气条件的最大流量为3.660kg/s,略小于均匀进气时的3.719kg/s。实际进气条件下的流量1.483kg/s远小于均匀进气条件下的流量2.723kg/s,即在小流量工况下,实际进气条件更容易导致计算发散。实际入口边界条件按上游设计点出口边界给定,在小流量条件下,中介机匣的实际入口总温、总压分布较设计点会有变化,入口条件的不匹配可能是计算易发散的原因。

需要说明的是,中介机匣本身不对气流做功或压缩,故不会像进气道或者压气机一样出现喘振,理论上中介机匣的最小流量可以为零,但数值计算过程中,在小流量工况,由于各种原因(小流量导致流道中马赫数过低,致使针对可压缩流动的数值算法不收敛;给定的进口边界条件与实际物理过程不匹配等),会导致计算发散,故本文中的中介机匣最小

流量指计算可收敛的最小流量。小流量状态下给定入口边界的不准确,会导致计算结果与实际情况存在一定偏差,且压气机一般无法在过小的流量下稳定工作,故本文不对中介机匣的最小流量进行详细分析。

图 6(b)为两种进气条件下中介机匣出口径向畸变指数 $\Delta \bar{\sigma}_{pt}$ 随流量 $\dot{m}$ 的变化图。可以看出:小流量情况下,两种进气条件下的中介机匣出口流场 $\Delta \bar{\sigma}_{pt}$ 都减小;实际进气条件下出口流场的高于均匀进气条件。本文中实际进气条件的入口气流 $\Delta \bar{\sigma}_{pt}=0.072$ 。实际进口条件下,大流量时,中介机匣对畸变起放大作用,小流量时可以减小畸变。

两种入口条件下中介机匣性能差异较大,在对中介机匣进行性能评价和发动机热力学计算时应充分考虑到实际来流条件的工作状态;不同流量工况,中介机匣总压畸变传递指数有明显差异,评价中介机匣性能时也应关注非设计点的情况。

3.2 阻塞流量裕度分析

从图 6(a)还可以看出,该中介机匣设计流量非常靠近最大流量,实际上该中介机匣流量裕度 M 仅为 1.36%。为研究中介机匣对压气机的阻塞作用,数值计算了均匀入口条件时,中介机匣下游压气机单独工作和与中介机匣共同工作时的特性线,结果如图 7 所示。图中 $\pi_{c,ref}$ 和 $\dot{m}_{ref}$ 分别为参考总压比和参考流量。可以看出,下游压气机与中介机匣共同工作时的阻塞流量明显小于压气机单独工作时的阻塞流量,总压比基本保持不变。

过小的阻塞流量裕度,会导致共同工作的压气机阻塞流量减小,另一方面,设计点流量靠近最大流量,由 3.1 节分析可知,中介机匣出口气流损失大、畸变大。故在设计中介机匣时,应该保证中介机匣留有足够的阻塞流量裕度,以降低损失、减少

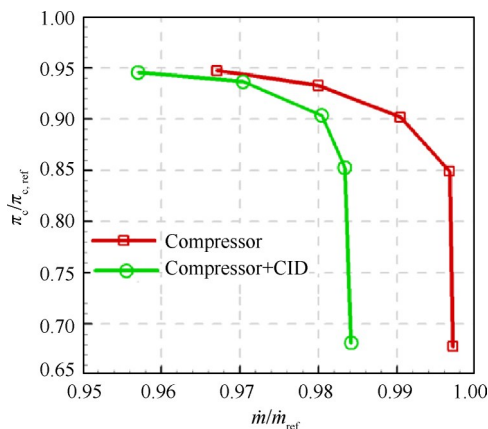


Fig. 7 Characteristic map of the compressor

畸变和阻塞。

3.3 中介机匣流动机理分析

为分析中介机匣流动损失和畸变传递机理,图 8 给出了均匀进气条件设计流量点和中等流量点支板 90% 弦长截面的涡量云图。可以看出壁面边界层区域和支板角区有明显的高涡量区,流量增加时,涡量明显增加,其中支板角区的增幅最为明显。可以推断,壁面处的高涡量区由边界层导致,支板角区的高涡量区由角区流动分离所致。涡量的增加会带来掺混的增加和总压损失,角区分离的加剧和边界层损失及掺混的增加是大流量时出口畸变增加和总压恢复系数减小的主要原因。在实际非均匀入口条件计算结果中也观察到了类似的现象。

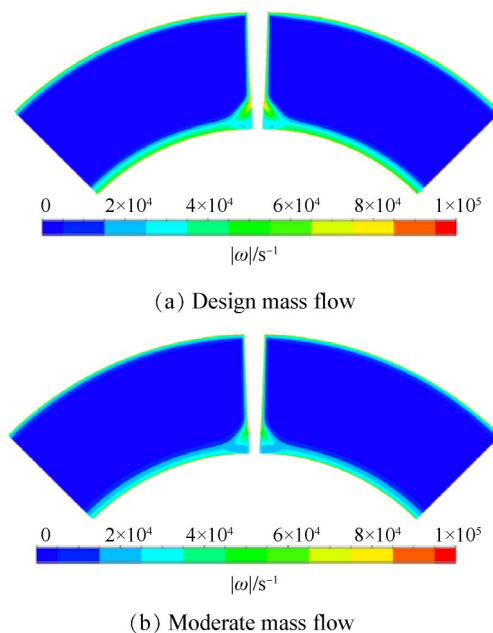


Fig. 8 Contours of magnitude of vorticity vector in uniform inlet condition

图 9 显示了两种进气条件下设计点流量的轮毂和支板壁面极限流线及子午面流线。可以看出,两种进口条件下,支板角区确实发生了流动分离,且实际入口条件下,分离较小。这与文献[13]中“轮毂区低总压区能抑制角区分离”结论相符。除支板角区外,轮毂壁面没有发生分离,且实际进气条件下总压损失明显大于均匀进气,可以推测径向的流动掺混损失应该是实际进气条件总压损失的主要来源。

图 10 给出了设计流量点轮毂和机匣的沿流动方向的周向平均压力分布, $\bar{p}$ 、 $\bar{l}$ 分别为无量纲静压和无量纲轴向长度。两种进气条件下,压力分布曲线趋势相似,压力曲线随壁面曲率折转,在流道内的上游

区域两种进口条件的压力曲线基本重合,在流道内的下游区域,实际进气条件两壁面静压略小于均匀进气。在支板尾缘轮毂区域,实际进气的逆压力梯度要小于均匀进气的逆压力梯度,这应该是实际进气支板轮毂角区分离区较小的原因。在流道转弯处,压力曲线出现若干“尖凸”,这可能与流道折转时流道曲率不连续有关。

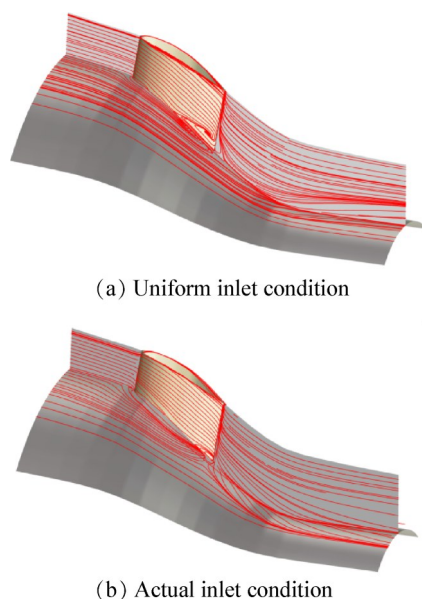


Fig. 9 Streamlines on uniform /actual inlet condition at design mass flow

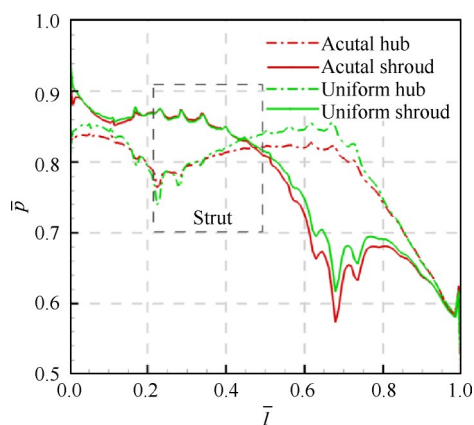


Fig. 10 Static pressure distribution of the hub and the shroud along the flow direction

图9中另一个值得注意的现象是,均匀入口条件,支板下游子午面流线向主流汇聚,实际入口条件,流线向端壁发散。汇聚流线会将边界层低能流体卷入主流区,而发散流线会将主流流体卷入边界层,图11和图12所示出口截面无量纲总压云图显示了此现象,由于轮毂壁面边界层明显厚于机匣壁面边界层,卷入现象更为明显,分别形成了低总压区A

和高总压区B,且在非设计点也存在同样的现象。该现象仅出现在支板尾迹区域,其产生应该和支板作用有关。流线的偏转原因一般是受到流道曲率和流线周围的静压影响,两种进气条件流道构型相同,推断应该是受静压影响。来流气体,经支板的阻挡,产生摩擦损失,总压下降,流过支板尾缘后,流通面积增大,亚声速气流膨胀减速,静压升高;在真实入口来流的情况下,主流区总压比壁面附近气流总压高

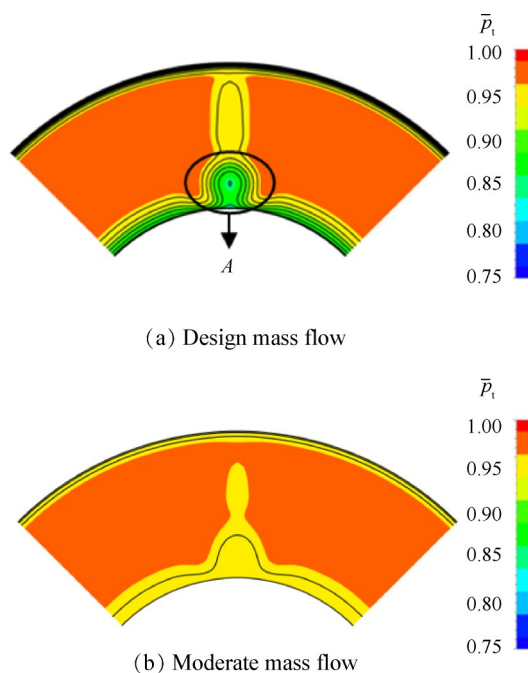


Fig. 11 Outlet total pressure contour in uniform inlet condition

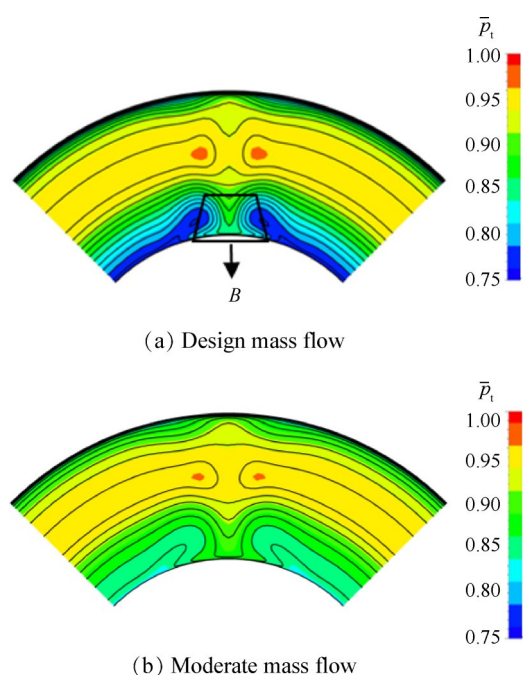


Fig. 12 Outlet total pressure contour in actual inlet condition

出较多,即使有一定的流动损失,减速增压后的静压仍然比壁面附近流体的静压高一些,故流线发散;在均匀总压进气条件下,支板附近主流区流体经历损失后,即便减速增压,静压仍小于周围流体,故子午面流线收敛。

出口截面无量纲总压云图还显示出,两种入口条件轮毂低总压区厚度远大于机匣区域,应该是该区域流体经历较长距离的逆压力梯度所致。大流量时,由于壁面边界层发展,导致壁面附近低总压区增大。实际进气条件下,总压分布的不均匀性更为明显,这主要是由于实际进气时入口壁面附近气流总压亏损较大。

4 结 论

本文从上下游匹配角度提出了考评中介机匣非设计工况的性能指标,并对某型发动机中介机匣在无来流预旋角情况下全流量工况特性进行了数值研究,获得了中介机匣全流量工况特性,对不同工况点的流动机理进行了分析,得到以下结论:

(1)中介机匣的全流量范围内的总压损失系数、畸变传递指数和阻塞流量裕度可以用来衡量中介机匣的综合性能,评价中介机匣性能时,应考虑这三个因素,并且关注非设计点性能。

(2)两种进口条件下,该型中介机匣的总压损失和出口总压畸变指数均随流量减小而减小,实际进气条件下该中介机匣总压损失和气流畸变指数均大于均匀进气条件,在对中介机匣进行性能评估和发动机热力学计算时,应考虑到实际来流条件下中介机匣的性能。

(3)中介机匣应该保证具有足够的流量裕度,当设计流量接近中介机匣最大流量时,中介机匣与压气机共同工作的阻塞流量会明显减小,且中介机匣总压损失和出口流场畸变均较大。

致 谢:感谢国家自然科学基金重点项目、引智计划以及民机专项科研项目的资助。

参考文献

- [1] Britchford K M, Carrote J F, Stevens S J, et al. The Development of the Mean Flow and Turbulence Structure in an Annular S-Shaped Duct[R]. *ASME 94-GT-457*.
- [2] Bailey D W. The Aero Dynamic Performance of an Annular S-Shape Duct[D]. UK: Loughborough University, 1997.
- [3] Bailey D W, Britchford K M, Carrote J F, et al. Performance Assessment of an Annular S-Shaped Duct[J]. *Journal of Turbo Machinery*, 1997, 199(1): 149-156.
- [4] Duenās C O, Miller R J, Hodson H. P, et al. Effect of Length on Compressor Inter-Stage Duct Performance[R]. *ASME 2007-GT-27752*.
- [5] 冯旭栋. 压气机中介机匣设计方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
- [6] 邓卫敏. 压气机中介机匣节流特性与畸变效应研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [7] Wallin F, Jörgen O, Johansson P, et al. High Speed Testing and Numerical Validation of an Aggressive Intermediate Compressor Duct[R]. *ASME 2013-GT-94315*.
- [8] 辛亚楠, 李家军, 韩 阳, 等. 大径向落差长度比中介机匣气动特性研究[J]. 推进技术, 2017, 38(4): 93-99. (XIN Ya-nan, LI Jia-jun, HAN Yang, et al. Numerical Study on Aerodynamic Characteristics of a Large Radius Change to Length Ratio Intermediate Duct[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(4): 93-99.)
- [9] 吴志昌. 高低压涡轮超紧凑过渡段流动机理数值研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [10] 李 斌, 吴亚东, 滕金芳, 等. 压气机中介机匣几何结构的试验验证[J]. 航空动力学报, 2013, 28(10): 2326-2331.
- [11] Gao L, Feng X, Deng W, et al. Effect of Inlet Conditions on Compressor Intermediate Duct[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G. Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 229(6): 1154-1168.
- [12] 向宏辉, 张 良, 陆庆飞, 等. 进气条件对压气机中介机匣流场影响的试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2011, 24(4): 19-23.
- [13] 高丽敏, 吴 瑜, 邓卫敏, 等. 压气机中介机匣畸变效应的数值研究[C]. 北京: 中国工程热物理学会2019年学术年会, 2019.
- [14] 高丽敏, 冯旭栋, 陈 璇, 等. 关于压气机过渡段设计方法的探讨[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1057-1063.
- [15] 邓小明, 高丽敏, 冯旭栋, 等. 压气机中介机匣三点NURBS曲线参数化方法[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(7): 1330-1333.
- [16] 冯旭栋, 高丽敏, 陈 璇, 等. 考虑支板影响的S弯过渡段设计优化方法研究[C]. 哈尔滨: 中国工程热物理学会2012年学术年会论文集, 2012.
- [17] Stürzebecher T, Goinis G, Voss C, et al. Automated Aerodynamic Optimization of an Aggressive S-Shaped Intermediate Compressor Duct[R]. *ASME 2018-GT-75184*.

(编辑:史亚红)