

文章编号:1000-8055(2012)02-0410-09

组合压气机中导流叶片的尾迹抖动特性

赵 奔¹, 杨 策¹, 张继忠², 李 杜¹, 祁明旭¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 中国北方发动机研究所 柴油机增压技术重点实验室, 山西 大同 037036)

摘 要: 为明确多排叶栅压气机中影响静叶尾迹抖动特性的因素及机理, 探索调制静叶尾迹抖动周期和幅值的方法, 采用数值方法对设计流量为 1.12 kg/s, 转速为 60 000 r/min 的一级轴流和离心叶轮组成的组合压气机的非定常流场进行模拟。结果表明: 静叶尾迹抖动除受几何因素影响外, 还受上下游转子干涉影响, 且上下游转子叶片通过频率的异同将影响静叶尾迹抖动的周期性。当上下游转子叶片同频通过时, 改变动叶的时序位置可以调制静叶尾迹抖动幅值的大小。另外, 静叶尾迹抖动幅值沿叶高方向并不相同, 低叶高处静叶尾迹抖动幅值明显大于中、高叶高处静叶尾迹抖动幅值。

关 键 词: 组合压气机; 非定常; 掺混; 尾迹抖动特性; 调制

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Stator wake variability in a combined compressor

ZHAO Ben¹, YANG Ce¹, ZHANG Ji-zhong², LI Du¹, Qi Ming-xu¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Science and Technology on Diesel Engine Turbocharging Laboratory,

China North Engine Research Institute, Datong Shanxi 037036, China)

Abstract: The unsteady flow in a combined compressor, which consists of axial flow and centrifugal compressor impellers, was simulated numerically at mass flow of 1.15 kg/s and speed of 60 kr/min (design point). The objective was an in-depth analysis of the factors caused stator wake variability. In addition, a method about changing cycle and amplitude of stator wake variability was presented. The results indicate that: stator wake variability is influenced by geometric factor, up- and downstream moving rows. The blade passing frequencies of up- and downstream rotor are related with the cycle of stator wake variability. Note that the equal blade passing frequencies in all stages, the clocking positions have much effect on the amplitudes of stator wake variability. Moreover, along the blade's high-ness, the amplitudes of stator wake variability are different, which located at low span was greater than that at mid-span and high-span.

Key words: combined compressor; unsteady; mixing; wake variability; modulation

叶片排间非定常相互作用非常强烈, 气流在流经叶片尾缘时, 会产生尾流, 并在叶片排之间区

域产生很大损失。而尾流抖动行为是尾迹损失大小的决定性因素之一。在多级压气机中, 尾迹的抖

收稿日期: 2011-03-11; 修订日期: 2011-09-16

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20101101110009); 国家自然科学基金(51006011);

国家高技术研究发展计划(2007AA050502)

作者简介: 赵奔(1985—), 男, 河北三河人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动热力学研究。

动特性不仅与尾迹损失和掺混损失的大小有关,还影响下游叶轮进口气流的畸变程度和叶片附面层非定常特性,并且还会影响到压气机的气动噪声和叶片的疲劳强度.因此,如果能够深入分析影响叶轮机械中叶片尾迹抖动特性的各非定常因素,并对各影响因素加以调制,实现叶轮机械中流动损失的减小和气动性能的提高,将是一项具有重要意义的工作.

国内外在叶片尾迹非定常流动的研究可以分为以下几个方面,一是孤立叶片排尾迹流动形态,主要对尾迹结构和涡脱落过程进行描述^[1].这一方面的研究主要在 1980 年代和 1990 年代的早期进行.二是多排叶片间的尾迹流动现象,主要关注级环境下的涡脱落^[2],尾迹和激波的相互作用,以及尾迹对下游叶片表面边界层转捩过程产生的影响.文献^[3]将涡轮吸力面的转捩过程总结为五种模式:自然转捩、直接转捩、分离转捩、尾迹诱导转捩和逆转捩,并从实验和理论两方面开展了大量的研究工作.这篇文献的工作为尾迹影响下游叶片表面边界层流动形态的研究打下了理论基础.随后,剑桥大学惠特尔实验室对多级环境下的轴流压气机和低压涡轮叶片表面边界层形态进行了详细的研究,使尾迹对边界层作用的理论进一步得到了完善^[4].目前这一方面的研究依然是叶轮机械研究的一个热点问题^[5-11].三是关于多排叶片环境下,尾迹在向下游运动过程中的输运和耗散过程,又可分为尾迹在压气机叶片排和涡轮叶片排内的压缩、拉伸、偏转、耗散的形态变化,从而导致涡轮和压气机存在时序效应现象.

从公开发表的文献来看,涉及多排叶片环境下,上下游转动叶片时序位置、通过频率及几何参数对静止叶片尾迹抖动特性影响的文章较少,更没有关注对抖动尾迹进行调控.

本文研究对象为一台组合压气机,依据非定常数值计算结果,分析了影响静叶尾迹抖动特性(如:周期、频率、幅值)的因素及影响机理,并初步探讨了针对静子叶片尾迹抖动幅值的控制方法.

1 计算方法及实验验证

组合压气机结构如图 1 所示,从进口到出口依次是轴流转子叶轮、导流静子叶轮、离心转子叶轮、无叶扩压器和蜗壳.其主要几何参数为:第一排转子叶轮半径为 52 mm,叶片数目为 12;第二排静子叶片数目为 17;第三排离心叶轮出口半径为 75 mm,主叶片数目为 9,分流叶片数目也为 9;

设计流量为 1.15 kg/s,转速为 60 000 r/min.

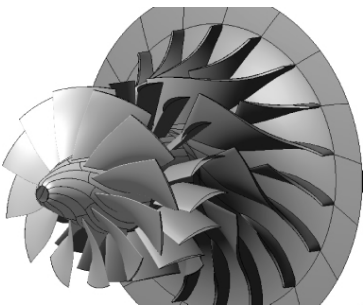


图 1 组合压气机叶排三维模型图
Fig.1 Impeller geometry of the combined compressor

叶栅通道空间离散网格由 IGG (interactive geometry modeller and generator)/Auto Grid 模块生成,采用 H-O 型结构化网格,其中进延伸段及扩压器采用 H 型网格,各排叶片采用 O 型网格,蜗壳采用蝶形网格.表 1 给出了各部分相应网格点数,除蜗壳外其他各段均为单通道网格点数.

表 1 网格数量
Table 1 Number of grid

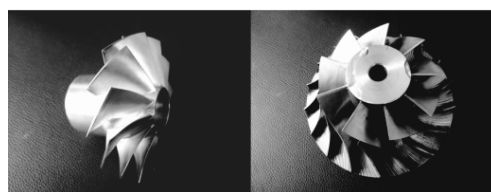
网格块	总数量	网格块	总数量
入口段	39 729	离心叶轮	662 250
轴流叶轮	323 663	扩压器	100 450
静子叶轮	203 389	蜗壳	749 438

数值计算采用 NUMECA 软件的 FINE/TURBO 软件包,求解三维定常/非定常的 Navier-Stokes (N-S)方程,湍流模型选用 Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型,时间项采用显式龙格-库塔时间推进和双时间步长.为了加快计算速度,采用多重网格技术.

非定常计算针对设计工况点,转子叶栅每旋转 2°设定一个物理时间步长,由此推出一个计算周期设定的物理时间步长数.每个物理时间步长内取 50 个虚拟时间步.

由于计算条件限制,本文将组合压气机模型中静子叶片数目修改为 18,同时缩放三排叶片数目为 4-6-3,使动静叶同时具有相同的周期性,再进行非定常计算.非定常计算网格点数约为 446 万.组合压气机特性实验测量在中国北方发动机研究所完成.由外源压缩空气吹动涡轮做功,涡轮带动压气机运转,通过调节外源压缩空气管路上的阀门以调节进风量,控制压气机的转速变化.当进风

量增加时,压气机的转速升高;进风量减少时,压气机的转速降低。通过调节压气机出气管路上的阀门开度,可以控制压气机的流量变化。在压气机性能试验时,主要进行压气机的转速、压气机前后的空气温度和压力、流量(流量计的压差)等性能参数的测量。转速的测量采用电子计数器来测量;压气机进出口的总压、静压、总温采用温度、压力传感器测量;流量的测量采用流量计,通过测量流量计前后的压力差,以及流量计前的压力和温度,用公式间接计算出流量。叶轮实物照片如图 2。



(a) 进口轴流叶轮

(b) 离心叶轮

图 2 叶轮实物照片

Fig. 2 The impellers

分别用组合压气机设计转速下效率-流量和压比-流量曲线效验计算结果,如图 3 和图 4,横轴为无量纲流量(实际流量除以设计流量)。图 3 中数值计算效率曲线与实验数据相符较好,只是数值计算没有准确捕捉到压气机的喘振点。图 4 为数值计算结果与实验压比曲线对比,从图中明显看出,除堵塞工况点,计算压比值均高于实验值,最大误差小于 2.5%。造成这种差别的原因应该是计算过程中壁面边界条件设定为绝热,没有考虑到壁面散热对压气机性能的影响。因此,上述对比基本证明了所使用网格和数值方法是可信的。

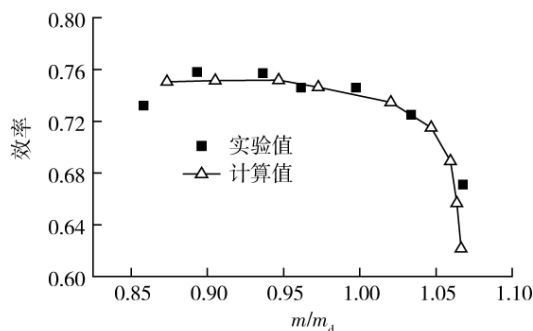


图 3 效率特性曲线

Fig. 3 Numerical and experimental compressor efficiency versus mass flow rate

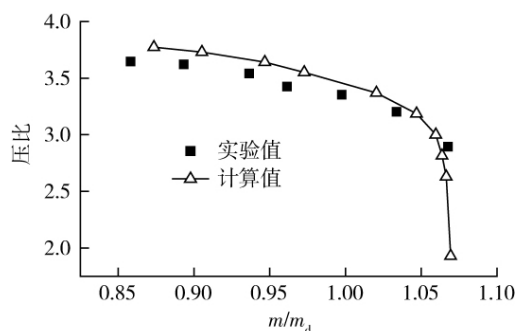


图 4 压比特性曲线

Fig. 4 Numerical and experimental compressor pressure ratio versus mass flow rate

2 计算结果与分析

2.1 影响静叶尾迹抖动特性的因素分析

当气流流过圆柱后,在圆柱的下游会产生尾迹并向下流输运,且尾迹具有周期性的抖动特性,这就是著名的卡门涡街。如果尾迹抖动特性完全由静子叶片尾缘的几何形状所决定,在叶高方向静叶尾缘厚度相同情况下,尾迹形态沿叶高方向上也应相同,且存在一定的周期性,实际情况并非如此。图 5 给出了组合压气机中静叶尾缘后不同叶高熵增值时空图分布,图中横坐标为静叶节距,纵坐标为时间,图中竖直抖动的条带为静叶尾迹区域。静叶尾迹两侧为静子叶栅通道,深浅色条带交替出现表示第一排轴流转子尾迹和非尾迹区气流交替通过。观察图 5 发现,在 20% 叶高位置上,静叶尾迹抖动呈现出明显的非周期性,随着叶高的增加,抖动规律性在加强,但也并未呈现严格意义上的周期性。从上面描述的尾迹流动形态可以推断出在上下游转子叶片的作用下,中间静子叶片尾迹特性并非完全由其自身几何形状决定。

为了进一步分析影响静叶尾迹抖动特性的因素,分别取 20%、50% 和 80% 叶高处静叶尾缘后尾迹中一点的熵值做幅频特性分析(如图 6)。在设计工况下,上游第一排轴流转子叶片通过频率为 12 kHz,下游离心叶轮主叶片通过频率为 9 kHz。由图 6(a)可以发现捕捉到的最大幅值频率为 12 kHz,与上游转子叶片通过频率相同;其次为 9 kHz,与下游离心叶轮主叶片通过频率相同;再次为 3 kHz,为上游轴流转子叶片和下游离心叶轮叶片通过频率的差值;图中显示还捕捉到了 2 倍频和 3 倍频(18, 21, 24 kHz)。这与文献[7]中频谱分析理论相似。从图 6(b)和图 6(c)可以看到类似的现象,只是最大幅值对应的频率不同,均为

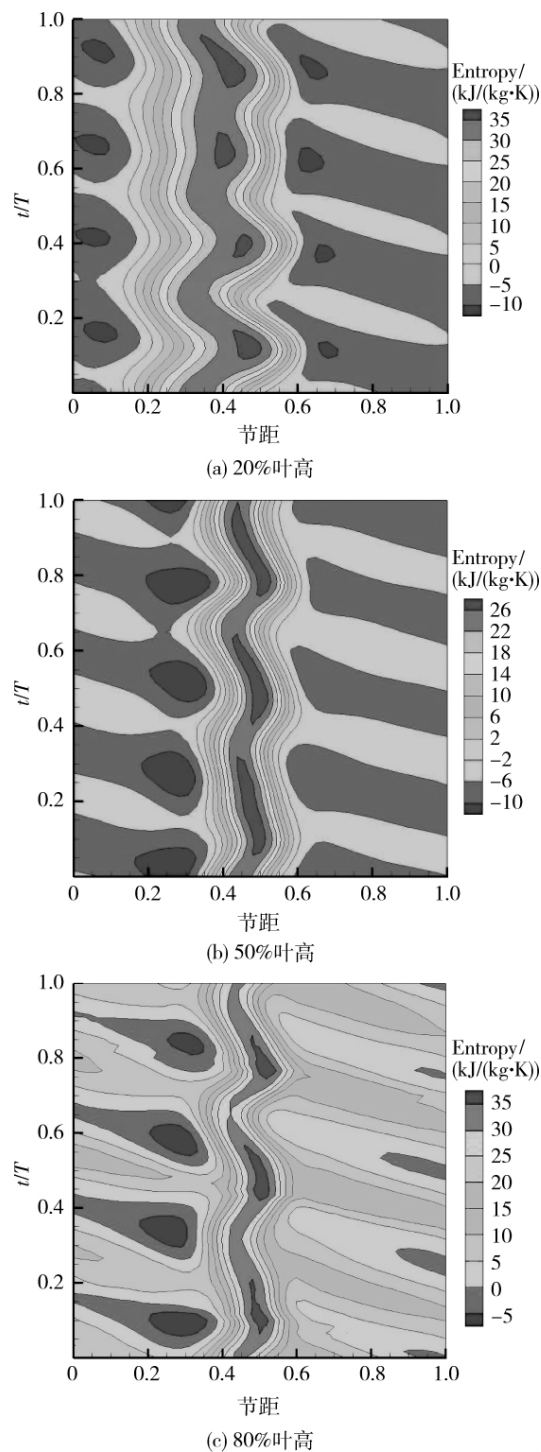


图5 静子尾缘后熵增值时空图

Fig. 5 Fluctuation of entropy on the downstream of stator

9 kHz,与下游离心转子主叶片通过频率相同.下游离心叶轮叶片前缘线速度随叶高增加而增加,由叶轮旋转产生势能的强度也将随叶高的增加而增强,相应转静子干涉强度也将沿径向增强,这可能是导致图6中三幅图最大幅值对应频率不同的主要原因.由频谱特性的分析可以得出如下的结论:上游转子和下游转子的旋转运动都会对静叶

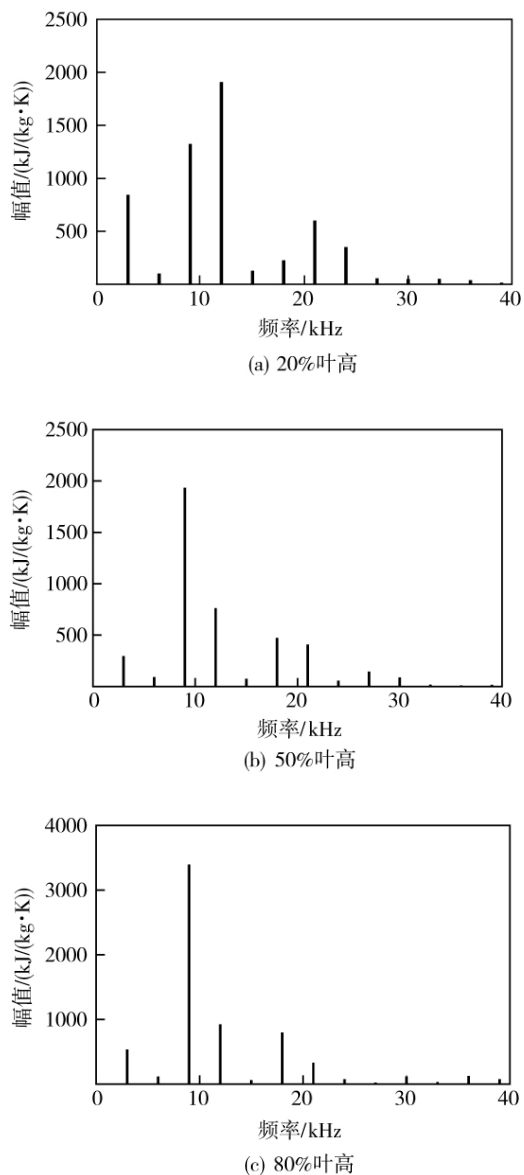


图6 静子尾缘后熵值幅频特性

Fig. 6 Amplitude frequent characteristic of stator wake

尾迹抖动特性产生影响.静子叶片尾迹的抖动之所以失去周期性应该是由上下游转子叶片通过频率的差别所导致.为了进一步证明这个结论,后面将给出上下游转子叶片数目变化对静子叶片尾迹抖动频率产生影响的结果.

2.2 影响静叶尾迹抖动特性的机理

首先确定下游转子对静叶尾迹抖动特性的影响机理,做相应叶高处静叶尾缘后尾迹两侧静压值的差值随时间变化曲线,如图7,图中横坐标为时间,纵坐标为静叶尾迹两侧静压值的差值,单位为kPa,从图上可以看出,静压差值呈现正负波动,在一个波动周期内出现双峰值,且随叶高的增加静压差值的波动幅值升高.产生这种现象的原

是因为离心叶轮主叶片吸力面靠近前缘处出现膨胀波和激波,在膨胀波和激波之间存在相对较低的低静压区域,膨胀波和激波向上游延伸,造成离心转子和静子间静压值沿周向分布不均.当离心叶轮高速旋转时,就会使这个区域的静压场出现周期性变化,从而导致静叶尾迹两侧静压差值呈现正负波动,以及曲线波动出现双峰值现象;膨胀波和激波强度随叶高的增加而增加,因此导致静叶尾迹两侧静压差值波动幅值随叶高的增加而增大.图 7 中静叶尾迹两侧静压差值的正负波动表明静叶尾迹两侧静压值高低交替,而这种周期性交替是造成静叶尾迹抖动的原因之一.这与文献[12]分析相符.且随叶高的增加,下游离心叶轮对静叶尾迹抖动特性的干涉强度增大.

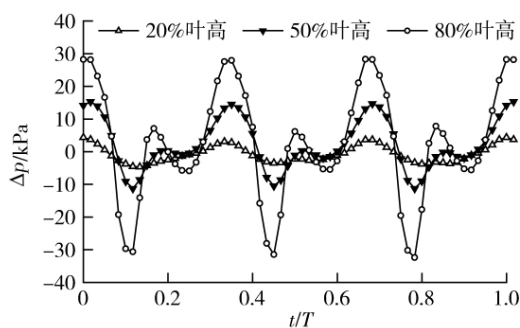


图 7 静叶尾迹两侧静压值的差值随时间分布

Fig. 7 Instantaneous static pressure difference between the two sides of stator wake

为了观察上游轴流转子单独作用下对静叶尾迹抖动特性产生的影响,有必要去除下游离心叶轮.基于这种想法,将第三排离心叶轮去除并修改轮缘和轮毂线,使模型变为单级轴流压气机,叶片数目为 12-18,对单级轴流压气机进行非定常数值计算,方法与上相同.

图 8 给出了静子叶栅出口 20%、50%和 80%叶高处熵增值分布时空图.观察图 8 可以发现,三个叶高处静叶尾迹均存在抖动特性,且抖动具有明显的周期性,这和图 5 存在明显的差别,说明下游转子叶片转动频率会影响到静子尾迹的抖动频率.对比三个叶高处静叶尾迹抖动幅值,可以发现,20%叶高处静叶尾迹的抖动幅值最大,其次为 50%叶高处,约占 20%叶高处静叶尾迹抖动幅值的 83%,80%叶高处静片尾迹抖动幅值最小,约占 20%叶高处静叶尾迹抖动幅值的 75%.沿叶高方向静叶尾迹抖动幅值存在差异性,这表明上游转子叶片转动频率影响着下游静子叶片尾迹的抖动频率和幅值.注意到静叶尾缘厚度沿叶高方向

相同,从而可以发现第一排轴流转子对静叶尾迹低叶高处抖动特性的影响高于中、高叶高处的影响.通过分析尾迹的频谱特性,还可以发现三个叶高处尾迹抖动频率相同,并且与上游转子叶片通过频率相同,这进一步证明静子尾迹抖动频率是由上游转子旋转频率决定的.

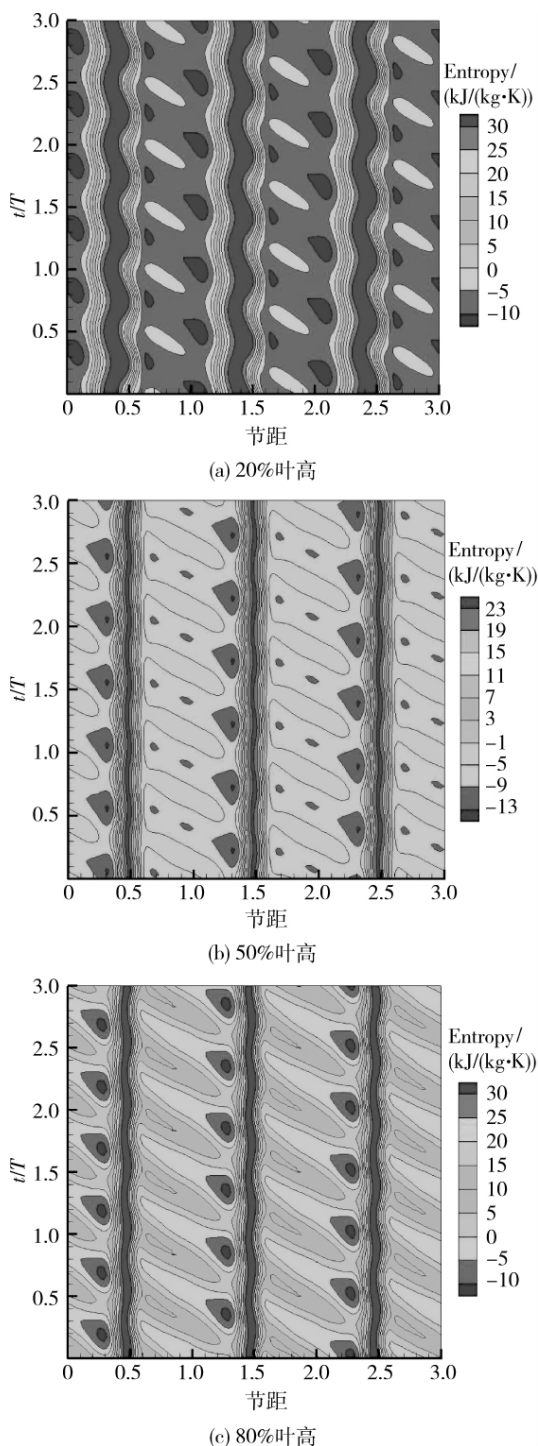


图 8 静子尾缘后熵值时空图

Fig. 8 Fluctuation of entropy on the downstream of stator

2.3 上下游转子叶片数目对静叶尾迹抖动周期性的影响

由上可知,图5中静叶尾迹抖动不具有严格的周期性,相反,图8中静叶尾迹抖动具有明显的周期性,产生这种差别的一个关键因素应该是上下游转子叶片的通过频率不同.在旋转速度保持不变的前提条件下,转子叶片通过频率是由叶片数目决定的.基于这种分析,将下游离心叶轮主叶片和分流叶片数目修改为12片,使上下游转子叶片数目相同,即在相同转速时上下游转子叶片通过频率相同.为了使计算结果具有对比性,非定常计算边界条件与未修改离心叶轮叶片数目时相同.

图9给出了离心叶轮叶片数目修改后静叶出口的熵值时空分布图.观察图9可以发现,三个叶高处静叶尾迹的抖动具有很强的周期性.由于三种叶高静叶尾迹抖动周期特性相同,所以图10仅给出一种叶高位置熵值幅频特性图.图中最大幅值对应频率为12 kHz,与上下游转子叶片通过频率相同,其次为叶片通过频率的倍频,未发现其他频率,说明静叶尾迹抖动频率为12 kHz,且具有较好的周期性.注意到图5和图9是在其他条件完全相同,只是离心叶轮叶片数目不同的情况下获得的计算结果,因此可以断定上下游转子叶片的通过频率会对静叶尾迹抖动周期产生影响.当上下游转子叶片通过频率相同时,静叶尾迹抖动具有较好的规律性(如图9),其抖动频率和上下游转子通过频率相同;当上下游转子叶片通过频率不同时,静叶尾迹抖动是在两种频率叠加效果的影响下,导致抖动幅值杂乱,不具有周期性(如图5).

在上下游转子通过频率存在差异情况下,静子尾迹抖动幅值呈现出杂乱的现象,这是由于转子叶片对静子叶片尾迹所产生的同步激励和异步激励所导致的.比如图5(a)中,0~0.5 t/T 时间段,上下游转子对静子尾迹抖动影响存在一定程度的同步激励,导致其抖动幅值较大,而0.5~1 t/T 时间段,上下游转子对静子尾迹抖动干涉基本处于异步激励,从而导致其抖动幅值较小,所以在一个计算周期内,图5(a)中静叶尾迹抖动没有周期性.

对比图8和图9还可以发现图9中静叶尾迹抖动幅值较大,分别为图8中静叶尾迹抖动幅值的3.1、1.3和2.0倍.分析其原因为上下游转子对静叶尾迹抖动影响刚好存在同步激励成分,即

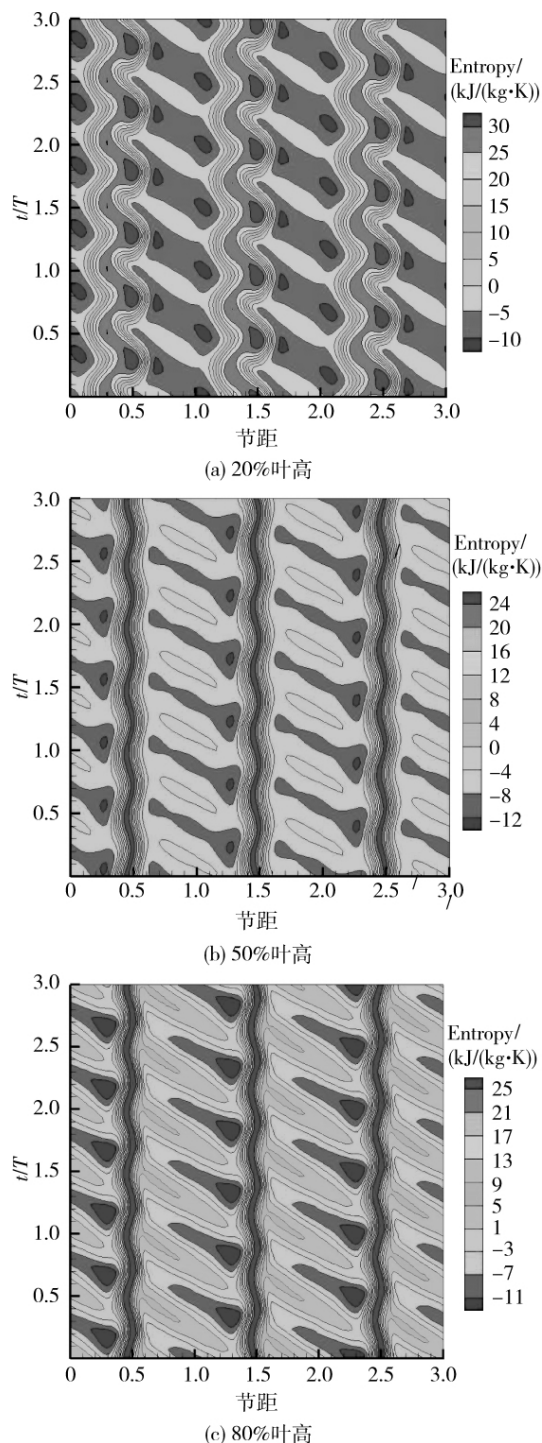


图9 静子尾缘后熵值时空图

Fig. 9 Fluctuation of entropy on the downstream of stator

产生一定程度的“共振”效应,导致静叶尾迹抖动幅值明显大于只有上游转子叶轮作用的抖动幅值.

2.4 静叶尾迹抖动幅值特性分析

从上面分析可以知道,静叶尾迹的抖动特性除受几何因素影响外,主要受上下游转子叶片干

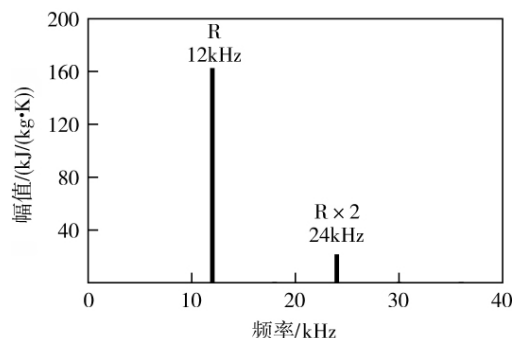


图 10 静子尾缘后熵值幅频特性, 50% 叶高

Fig. 10 Amplitude frequent characteristic of stator wake, 50% span

涉影响. 当上下游转子叶片对静子叶片尾迹抖动干涉步调处于同步激励时, 就产生了“共振”效应, 尾迹抖动幅值将达到最大, 此时, 静叶尾迹和非尾迹区域气流掺混速度最大; 当上下游转子叶片对静叶尾迹干涉步调处于完全异步激励时, 即呈现出相互“制约”效应, 静叶尾迹抖动幅值将达到最小, 此时, 静叶尾迹和非尾迹区气流掺混速度最小. 另外, 静叶尾迹和非尾迹区域气流的掺混速度将影响下游离心叶轮进口处气流的畸变程度和离心叶轮内气流的非定常性能, 还会影响到压气机噪声和离心叶轮附面层非定常流动. 为了调制离心叶轮进口处气流的畸变程度和静叶尾迹与主流的掺混损失, 就需要调制静叶尾迹抖动幅值. 为了便于观察尾迹抖动幅值变化情况, 本文以修改离心叶轮叶片数目后的模型为对象(时序位置 1), 通过将第一排转子相对第三排离心转子叶片依次周向旋转 6° , 12° , 18° 和 24° (时序位置分别为 CP2, CP3, CP4, CP5), 实现改变上下游转子叶片对静叶尾迹抖动的干涉步调. 以在相同工况下进行的非定常计算结果为依据, 分析不同叶高位置不同干涉步调对静叶尾迹抖动幅值的影响.

在静叶尾迹抖动频率一定的条件下, 抖动幅值越大, 静叶尾迹和非尾迹区气流发生掺混越快, 尾迹区域的熵增将变得越小, 而尾迹两侧边界区域(尾迹与非尾迹气流发生掺混区域)熵增将越大. 图 11 是不同时序位置静叶出口 20% 叶高处熵增时均值, 图中曲线波峰为静叶尾迹区域. 由图 11 可以推断出, 当上下游转子位于时序位置 1 时, 尾迹区域内熵增最小, 说明尾迹抖动幅值最大. 当上下游转子叶栅位于时序位置 4 时, 尾迹区域熵增最大, 说明尾迹抖动幅值最小.

为了证实由图 11 得出的结论, 图 12 给出了时序位置 4 静叶出口 20% 叶高处熵值时空图, 可

以发现静叶尾迹抖动幅值较图 9(a) 明显减小, 抖动幅值相对图 9 减小 68%. 从而可以证实这种改变上下游转子相对周向位置的方法对调制低叶高处静叶尾迹抖动幅值特性是十分有效的.

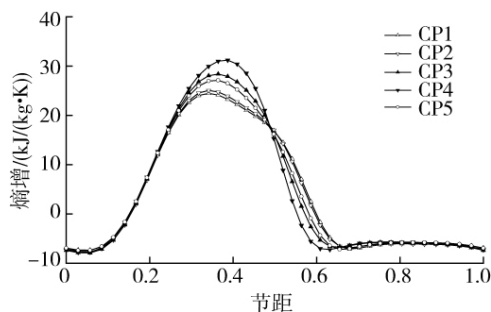


图 11 不同时序位置静叶出口 20% 叶高处熵增值(时均值)分布

Fig. 11 Time-averaged entropy at 20% span for CP1~CP5

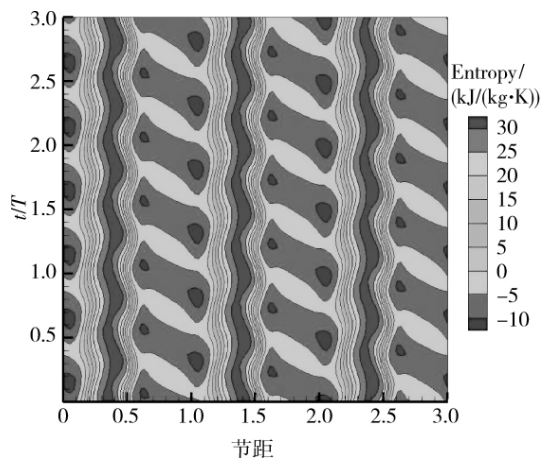


图 12 时序位置 4 时静叶出口 20% 叶高处熵增值时空图

Fig. 12 Fluctuation of entropy on the downstream of stator at 20% span for CP4

下面看一下中、高叶高位置上, 不同转子叶片时序位置上静子叶片尾迹抖动幅值变化. 图 13 是两个叶高位置上, 不同时序位置熵值在周向上的分布曲线, 可以得出, 当上下游转子位于时序位置 5 时, 尾迹区内熵增最大, 尾迹抖动幅值应最小. 图 13(a) 中, 时序位置 2 和时序位置 3 对应曲线基本重合, 而图 13(b) 中, 当上下游转子位于时序位置 2 时, 尾迹区内熵增最小, 则尾迹抖动幅值应最大. 动叶位于时序位置 2 和时序位置 5 尾迹抖动时空图在图 14 和图 15 给出, 对比这两个图可以发现静叶尾迹抖动幅值变化较大, 图 15 抖动幅值相对图 14 分别减小 43% 和 37%, 从而可以验证这种改变上下游转子相对周向位置的方法对调

制中高叶高区域静叶尾迹抖动幅值特性也是十分有效的。

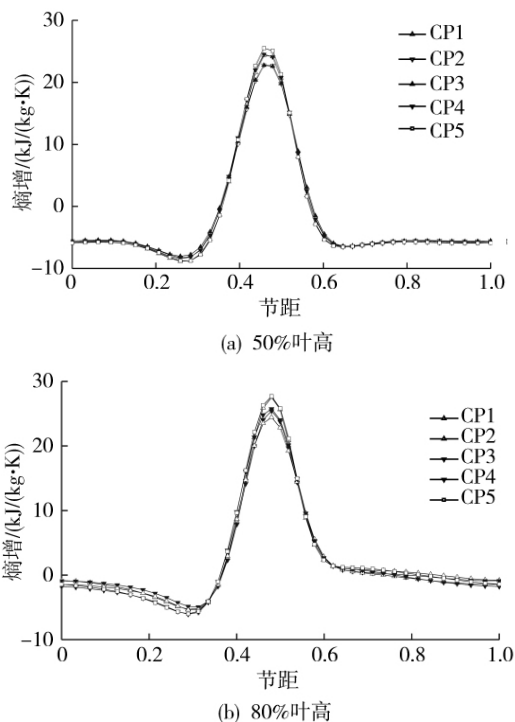


图 13 不同时序位置静叶出口处熵增值(时均值)分布

Fig. 13 Time-averaged entropy at 50% and 80% span for 5 CPs

由于静叶尾迹抖动幅值受上下游叶轮的共同作用,且上下游叶轮对静叶尾迹抖动干涉步调在全叶高方向并不相同,因此静叶尾迹抖动幅值在同一个时序位置不能实现全叶高达到最大或最小值。

要进一步分析静叶尾迹抖动幅值在不同叶高处有无变化,就需要针对更多个时序位置对比静叶尾迹抖动的最大和最小幅值。三个叶高处静叶尾迹抖动均达到最大幅值时,对比图 9(a)、图 14(a)和图 14(b)可以发现,20%叶高处静叶尾迹抖动幅值最大,其次是 80%叶高处,约为 20%叶高处静叶尾迹抖动幅值的 63%,再次为 50%叶高处静叶尾迹抖动幅值,只相当于 20%叶高处静叶尾迹抖动幅值的 43%。当三个叶高处静叶尾迹抖动均达到最小幅值时,对比图 12、图 15(a)和图 15(b)同样可以发现,80%叶高位置处静叶尾迹抖动幅值最小,其次是 50%叶高处,约为 80%叶高处静叶尾迹抖动幅值的 1.2 倍,再次为 20%叶高处,约为 80%叶高处静叶尾迹抖动幅值的 1.8 倍。从而可以得出五个时序位置中三个叶高位置

静叶尾迹抖动最大幅值并不相同,其中 20%叶高位置处静叶尾迹抖动幅值最大;五个时序位置中三个叶高位置静叶尾迹抖动最小幅值也不相同,其中 80%叶高处最小。

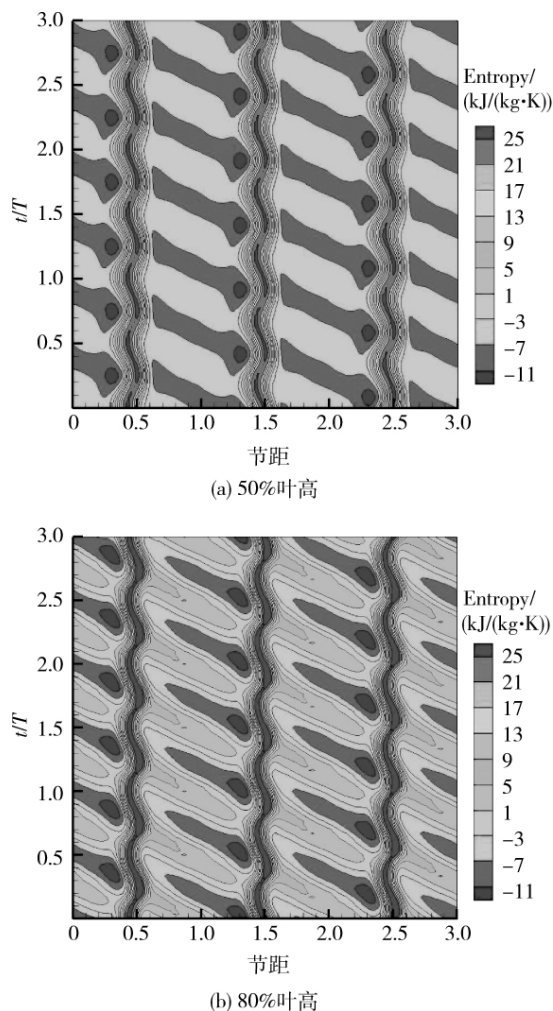
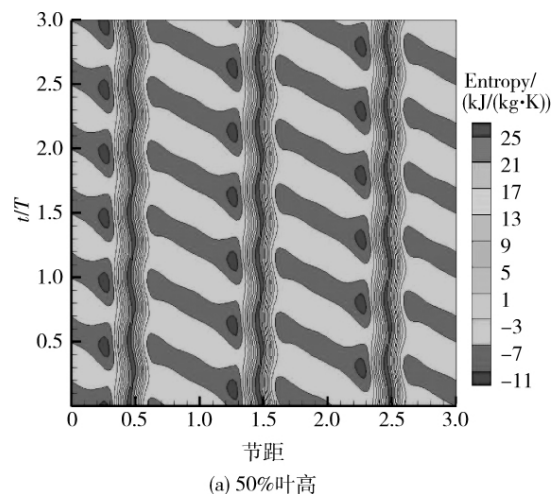


图 14 时序位置 2 时静子叶栅出口熵增值时空图

Fig. 14 Fluctuation of entropy on the downstream of stator for the CP2



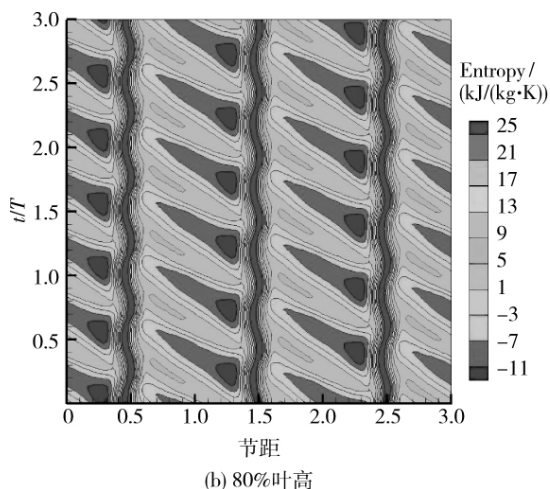


图 15 时序位置 5 时静子叶栅出口熵
增值时空图

Fig. 15 Fluctuation of entropy on the downstream
of stator at for the CP5

3 结 论

通过上述分析可以得出如下结论:

1) 静叶尾迹的抖动特性除受几何因素影响外,还受上下游转子叶片共同作用,且下游离心叶轮对静叶尾迹抖动特性的影响是通过周期性更替静叶尾迹两侧静压高低实现。

2) 上下游转子叶片的通过频率影响静叶尾迹抖动周期特性。当上下游转子叶片通过频率不同时,静叶尾迹的抖动特性处于两种不同干涉频率叠加作用效果,尾迹的抖动不具有周期性;当上下游转子叶片通过频率相同时,静叶尾迹的抖动特性处于相同干涉频率叠加作用效果,尾迹抖动呈现明显的周期性,且抖动频率与上下游转子叶片通过频率相同。

3) 上下游转子的时序位置影响静叶尾迹抖动幅值特性。改变上下游转子叶轮时序位置的方法可以改变上下游转子对静叶尾迹抖动特性的激励步调,从而实现对静叶尾迹抖动幅值特性的调制。

4) 当上下游转子叶片对静叶尾迹抖动特性处于同频干涉时,低叶高处静叶尾迹抖动幅值明显大于中、高叶高处静叶尾迹抖动幅值。

参考文献:

[1] Prato J, Lakshminarayana B. Investigation of compressor

rotor wake structure at peak pressure rise coefficient and effects of loading[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115(2): 487-500.

- [2] Pullan G, Denton J D, Dunkley M J. An experimental and computational study of the formation of a streamwise shed vortex in a turbine stage[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125(2): 291-297.
- [3] Mayle R E. The role of laminar-turbulent transition in gas turbine engines[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113(3): 509-537.
- [4] Halstead D E, Wisler D C, Okiishi T H, et al. Boundary layer development in axial compressors and turbines part 1 of 4: composite picture[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(1): 114-127.
- [5] Ernst M, Michel A, Jeschke P. Analysis of rotor-stator interaction and blade-to-blade measurements in a two stage axial flow compressor[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1): 011027(12 pages).
- [6] Nolan S P R, Botros B B, Tan C S, et al. Effects of upstream wake phasing on transonic axial compressor performance[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2011, 133(2): 021010(12 pages).
- [7] Key N L, Lawless P B, Fleeter S. Rotor wake variability in a multistage compressor[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(2): 344-352.
- [8] Estevadeordal J, Gogineni S, Goss L. DPIV study of wake rotor synchronization in a transonic compressor[R]. AIAA Paper, 2001-3095, 2001.
- [9] Sanders A J, Fleeter S. Rotor blade-to-blade wake variability and effect on downstream vane response[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(2): 456-464.
- [10] 刘波, 曹志鹏, 蔡元虎, 等. 叶栅流场尾迹中非定常涡系的数值模拟[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(5): 562-566. LIU Bo, CAO Zhipeng, CAI Yuanhu, et al. Numerical simulation of unsteady vortex in the wake of cascade flow[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(5): 562-566. (in Chinese)
- [11] 项效镨, 刘波, 王庆伟, 等. 小型轴流压气机静叶排出口尾迹流动特性[J]. 航空学报, 2009, (11): 2045-2051. XIANG Xiaorong, LIU Bo, WANG Qingwei, et al. Flow characteristics of stator wake in small axial compressor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2045-2051. (in Chinese)
- [12] Oro J M F, Díaz K M A, Morros C S, et al. Analysis of the deterministic unsteady flow in a low-speed axial fan with inlet guide vanes[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(3): 031101(12 pages).