

脉冲频率对径向涡轮转子进口流动特性的影响

王智慧^{1,2}, 马朝臣¹, 祝飞¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 晋中学院 机械系, 山西 晋中 030619)

摘 要: 可调涡轮增压器涡轮转子进口的动静干涉效应以及脉冲气流的波动使得转子进口流动更为复杂,进而影响转子通道内的气体流动。为了更好地了解脉冲频率对涡轮转子进口流动特性的影响,应用 ANSYS CFX 软件对不同频率(20、40、60 Hz 和 80 Hz)脉冲进气条件下的全周径向可调涡轮模型进行数值模拟,并通过试验数据对数值模型进行了验证,得出转子进口平均气流角在一个脉冲周期内的分布规律以及气流角在周向和叶高方向的分布规律。发现脉冲频率对低压侧转子进口入射角影响更大,脉冲频率越低,低压侧的转子进口负入射角越大;周向绝对气流角分布规律相似,波动幅度基本相同;相对气流角在压力下降沿波动更稳定。

关 键 词: 脉动气流; 脉冲频率; 径向可调涡轮; 气流角; 转子进口

中图分类号: V231.3; TK474

文献标志码: A

Influence of pulsating frequencies on characteristic of radial turbine rotor inlet flow

WANG Zhihui^{1,2}, MA Chaochen¹, ZHU Fei¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Department of Mechanics, Jinzhong University, Jinzhong Shanxi 030619, China)

Abstract: Detailed understanding of the flow interaction within the complex geometry of turbine stage coupled with the imposed unsteady pressure waves was presented. A fully validated numerical model was established based on ANSYS CFX code. For this purpose, four unsteady simulations of 20, 40, 60 and 80 Hz together with the steady state simulations were conducted. The flow angle distribution in a pulsating cycle and at the circumferential and spanwise positions was analyzed in different pulsating frequency conditions. The results showed that the pulsating frequency mainly affected the inlet incidence angle of rotor at the high pressure side, moreover, the lower the pulse frequency, the greater the negative incident angle of the low pressure side. It was also found that the absolute flow angle distribution at circumferential position was similar and the relative flow angle fluctuations during the pressure decrements instances was significantly lower as compared with that during pressure increment instances.

Key words: pulsating flow; pulsating frequency; radial variable nozzle turbine; flow angle; rotor inlet

收稿日期: 2020-07-01

作者简介: 王智慧(1986—),女,讲师,博士生,主要从事叶轮机械气动力学研究。

引用格式: 王智慧,马朝臣,祝飞. 脉冲频率对径向涡轮转子进口流动特性的影响[J]. 航空动力学报,2021,36(3):646-654. WANG Zhihui, MA Chaochen, ZHU Fei. Influence of pulsating frequencies on characteristic of radial turbine rotor inlet flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(3): 646-654.

对于内燃机,现在普遍的做法是通过涡轮增压技术增加其进气密度以获得更高的比功率,减小内燃机的设计尺寸。然而,涡轮增压器只能在发动机工况的很小范围内高效运行,人们普遍认为,往复式发动机排气产生的脉动流是导致涡轮性能偏离稳态的主要原因,偏离定常流动条件的程度取决于一些参数,如涡轮转速、发动机排气脉动频率和脉动幅度。因此,提高涡轮增压器在脉动排气条件下的废气利用能力一直是人们关注的问题。

早就有研究人员发现涡轮准稳态算法存在缺陷,其结果与试验相比存在较大误差,不能准确地预测涡轮在非稳态情况下的真实特性^[1-2]。因此,近些年来国内外学者对脉冲条件下的涡轮非稳态特性进行了大量研究。Karamanis 等^[3-4]研究了高压比混流式涡轮增压器在稳态和脉动流动条件下的性能,结果表明其性能和流动特性与涡轮增压器设计中常用的等效稳态值存在显著偏差。Yu 等^[5]系统分析了车载涡轮增压器非定常特性的测量和计算方法,并在此基础上开发了试验台,为涡轮增压器非定常特性的研究提供了试验手段。Padzillah 等^[6]研究了脉冲进气条件下涡轮级流场,并通过与涡轮试验性能和流场测量结果进行比较,评估了其准确性。Costall 等^[7]通过对脉冲周期内不同时刻复杂流场特性的详细分析,指出了需要进一步研究的叶片几何区域,从而提高整个脉冲周期内涡轮的综合性能。杨名洋等^[8]研究了某混流涡轮在脉冲条件下的涡轮特性,通过一个解析模型和开发的一维非稳态代码,阐明了脉动流对涡轮非定常性能的影响。Padzillah 等^[9]分析了脉冲频率和涡轮转速对增压器涡轮性能的影响,结果表明涡轮进口脉动压力与涡轮效率之间没有直接的瞬时关系,除非考虑一个附加参数,即入射角。Lee 等^[10]研究了脉冲形状对某一混流涡轮性能的影响,分析了四种脉冲形式,即方波、角波、正弦波以及发动机真实脉冲形状对涡轮瞬态性能的影响,并深入分析了每种脉冲条件下的涡轮物理流动过程和损失机理。Lee 等^[11]分析了脉冲条件下混流涡轮进口脉冲频率、负荷以及脉冲数对涡轮前缘流动特性的影响。

根据 Watson 和 Janota^[1]的研究,涡轮等涡流式机械只能在有限的工作范围内高效运转,这在很大程度上取决于转子进口处的入射角度。Japikse 和 Baines^[2]指出由于叶片表面的流动分离,导致损失最小的最佳入射角范围为 $-20^{\circ}\sim$

-30° ,并指出入射损失是涡轮工作在非设计点的主要损失来源。因此,对于径向涡轮在脉动流条件下转子进口气流分布的分析及损失机理的研究对于涡轮设计以及提高脉冲能量利用率也是很有必要的。

鉴于此,本文针对某型带喷嘴环的径向涡轮,应用 CFD^[12-14] 方法分析研究了脉冲频率对涡轮进口流动特性的影响以及流动损失机理,提高对径向涡轮在不同脉冲频率下的流动特性的认识,旨在更好地了解实际发动机条件下涡轮转子所处的工作环境,为径向涡轮设计以及增压器与发动机匹配提供理论依据与有力手段。

1 数值分析

1.1 计算模型

本文以国内某国五发动机所用可调涡轮增压器为研究模型,增压器涡轮主要包括蜗壳、可调喷嘴环和转子 3 部分,喷嘴环有 10 个导叶叶片,转子有 9 个叶轮叶片,其主要结构如图 1 所示,可调几何涡轮(variable geometry turbine or variable nozzle turbine,VGT 或 VNT)模型主要部件参数如表 1 所示。

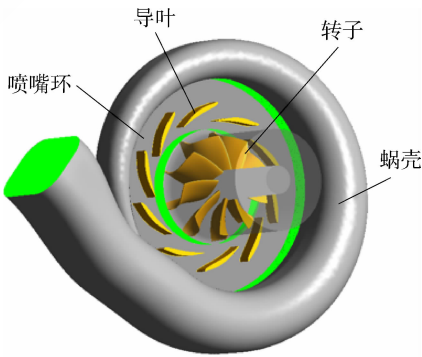


图 1 增压器涡轮模型主要结构部件三维图
Fig. 1 Three-dimensional model of the main components of the turbocharger turbine

表 1 涡轮模型主要参数
Table 1 Main parameters of the turbine model

部件	参数	数值
静子	导叶片数量	10
	导叶间隙/mm	0.23
	导叶弦长/mm	19
	导叶叶高/mm	6.5

续表

部件	参数	数值
转子	叶片数量	9
	进口平均直径/mm	44
	出口轮毂直径/mm	12
	出口轮缘直径/mm	40

1.2 数值方法

本研究采用商业计算流体力学(CFD)软件包 ANSYS CFX 17.2 进行数值计算。蜗壳和出口区域采用 ICEM CFD 开发的非结构化四面体网格,网格节点数为 19.6 万,网格单元为 69.9 万,喷嘴环和转子区域采用在 ANSYS Turbo Grid 中完成的六面体结构网格,喷嘴环单通道网格节点数为 40.6 万,单元为 37.9 万;转子单通道节点数为 68.8 万,单元为 64.7 万。所有的 CFD 模拟都使用切应力传输(SST)湍流模型。对靠近壁面的网格进行细化获取边界层内参数的梯度。涡轮全周三维网格如图 2 所示。

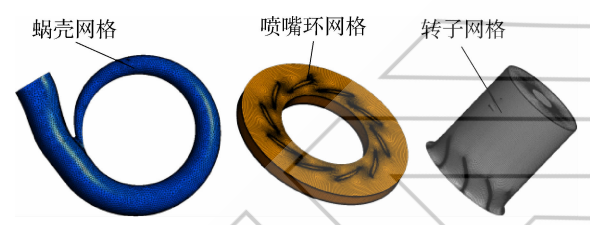


图 2 涡轮三维网格

Fig. 2 Three-dimensional mesh of the turbine model

在网格无关性验证中,以涡轮进口质量流量和导叶转轴所受气动力矩为目标,网格数目为变量。随着网格数目的增加,可调涡轮的这两个参数不再发生明显变化时认为网格无关性工作完成。其中,中、细网格质量流量与转矩的差值分别为 1.67%和 1.46%,均小于粗、中网格之间的差 4.18%、3.46%,因此,选择中等密度网格进行仿真。

所有离散化的几何结构之间的交界面包括转-静交界面(转子-喷嘴环)和静-静交界面(蜗壳-喷嘴环)。转子和喷嘴环之间的交界面选择瞬态交界面(transient rotor stator),以允许涡轮叶轮区域相对于静止叶片旋转。

进口边界条件为涡轮入口总温、总压及速度方向,出口边界条件为涡轮出口静压。采用绝热无滑移固壁条件结合壁函数方法。本文采用

143 000 r/min 的恒定涡轮转速,选择的脉冲频率为 20、40、60 Hz 和 80 Hz。以发动机 2 000 r/min 点的涡轮进口总压作为脉冲进气条件下的涡轮平均进口总压,其值为 97.8 kPa,涡轮进口平均总温为 857 K。早在 1986 年,Dale 和 Watson^[15]通过非稳态试验得到车用增压器径流涡轮的进口参数变化情况,试验表明涡轮前燃气压力和温度均随时间变化,其波动近似正弦波。北京理工大学齐明旭等^[16]以及瑞典皇家理工学院 Hellström^[17]研究脉冲进气对涡轮内部流动的影响时,均对涡轮进口参数的变化简化成正弦波来处理。因此,本文也把涡轮进口压力和温度简化成正弦波来处理,另外,相关研究表明涡轮出口的实际压力也是近似正弦脉动的^[18],但由于涡轮出口压力相对于进口压力较小,相关文献中对其进行了简化处理^[16],用平均静压来表示,本文亦采用同样的处理方式。

涡轮进口脉冲简化为正弦波,涡轮进口按照正弦变化的瞬态总压定义为

$$p_{1,inst}^* = p_{1,av}^* - A \sin(2\pi ft) \tag{1}$$

式中 $p_{1,inst}^*$ 表示瞬态总压; $p_{1,av}^*$ 是脉冲平均总压; A 表示振幅; f 为频率; t 是时间。同时,根据管道流动中等熵关系,可以得到瞬态总温值

$$T_{1,inst}^*/T_{1,av}^* = (p_{1,inst}^*/p_{1,av}^*)^{(\kappa-1)/\kappa} \tag{2}$$

式中 $T_{1,inst}^*$ 为瞬态总温, $T_{1,av}^*$ 为循环平均总温, κ 为等熵指数, $\kappa=1.4$ 。

根据以上公式,可以得到 VNT 进口边界条件。图 3 出示了本文采用的涡轮进口不同脉冲频率的压力变化曲线。时间步长设置为 1.4×10^{-5} s,相当于转子叶片转动一步为 3°。

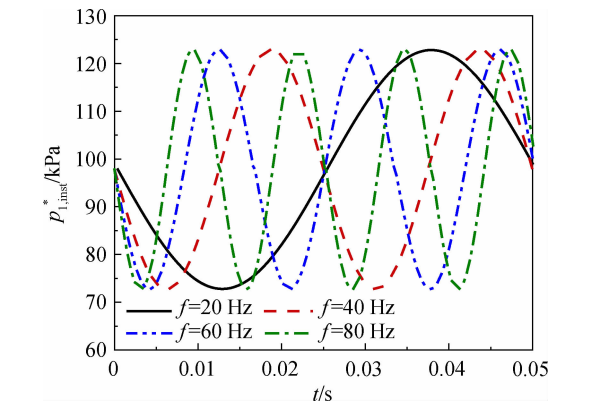


图 3 不同脉冲频率条件下涡轮进口总压边界条件
Fig. 3 Total pressure boundary conditions at the turbine inlet for different pulsating frequencies

1.3 CFD 模型试验验证

本文应用涡轮性能试验对数值模型进行试验验证,具体试验方法和试验原理参见文献[19]。本数值模型验证是基于 VNT 的某个固定导叶开度和一系列转子速度(80 000~160 000 r/min,速度间隔为 20 000 r/min)进行的。涡轮性能参数可以由下列公式表达:

$$\eta_t = \frac{W_{t,act}}{W_{t,ad}} = \frac{c_p(T_{t1}^* - T_{t2}^*)}{\frac{\kappa}{\kappa - 1}RT_{t1}^* \left(1 - \frac{1}{\pi_{t1}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}\right)} \tag{3}$$

$$\pi_{t1} = \frac{p_{t1}^*}{p_{t2}^*} \tag{4}$$

式中 η_t 为涡轮的等熵效率; $W_{t,act}$ 为涡轮实际膨胀功; $W_{t,ad}$ 为涡轮的等熵膨胀功; π_{t1} 为涡轮膨胀比; T_{t1}^* 和 T_{t2}^* 分别为涡轮进口总温和出口总温;等熵指数 $\kappa=1.4$;气体常量 $R=287\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;比定压热容 $c_p=1006\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; p_{t1}^* 和 p_{t2}^* 分别为涡轮进口总压和出口静压。

图 4 为采用 CFX 数值计算的涡轮质量流量

特性与等熵效率特性与试验对应值的对比结果,其中 $\dot{m}$ 为质量流量, η_t 为等熵效率。可以看出该模型的数值模拟结果与试验结果吻合较好,差异小于 5%,该误差可能是由于几何差异及计算模型的局限性引起的。另外,试验中的喷嘴叶片角度是采用位置测量仪测量得到的,所得结果与精确值可能存在误差,也会导致计算结果与试验结果的差异。因此该模型的计算结果是可以进行讨论的。

2 结果分析

2.1 脉冲频率对转子进口入射角的影响

在一个脉冲循环内,涡轮进口压力和质量流量波动很大,从而使得进入转子叶片的速度方向经常偏离最佳流动方向。在此种流动情况下,转子进口入射角损失是涡轮效率下降的主要原因。转子进口入射角 i 可以定义为

$$i = \beta_r - \beta_b \tag{5}$$

式中 β_r 为涡轮进口处的相对气流角, β_b 为涡轮前缘叶片角。由于涡轮进口流动呈现脉动形式,导致涡轮进口绝对气流角和相对气流角都呈现脉动形式,致使转子进口入射角偏离了 $-20^\circ\sim-40^\circ$ 的最佳入射角范围。

本文数值计算工况选择设计点工况,因此稳态条件(均匀进气)转子进口入射角在最佳入射范围内,稳态进气数值计算结果转子进口入射角为 -20.25° 。图 5 出示不同脉冲频率下转子进口入射角的变化分布,其中 ϕ 为相角。可以看出,脉冲进气使得转子进口入射角严重偏离稳态结果,在相位 90° 和 270° 位置,偏离最为严重,相位 90° 位置,出现极大负入射角,可达 -60° ,相位 270° 位

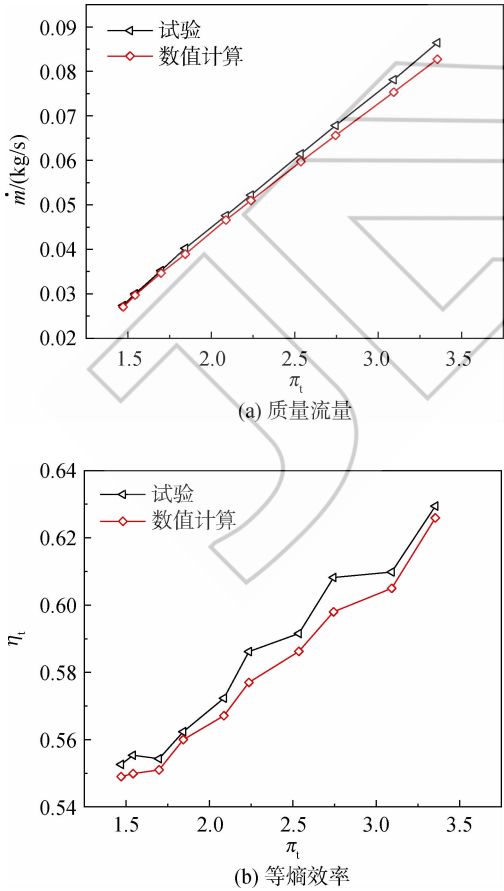


图 4 涡轮的试验与数值计算性能对比
Fig. 4 Comparison of turbine performance between the experiment and calculation

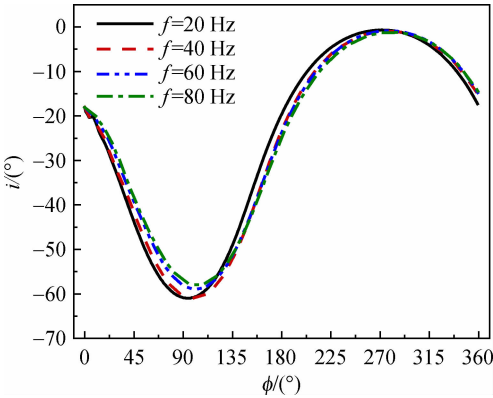


图 5 不同脉冲频率条件下转子进口入射角
Fig. 5 Incidence angle at the rotor inlet for different pulsating frequencies

置,转子进口入射角在 0° 附近。具体地,对于不同脉冲频率可以发现,脉冲频率对小压力侧的转子进口入射角影响较大,脉冲进气频率越低,负入射角越大;对于高压侧,脉冲频率对转子进口入射角影响较小,在相位 270° 位置,4 种频率下的转子进口入射角几乎为同一常数。

图 6 出示了不同脉冲频率条件转子进口最小和最大转子进口入射角时转子叶片前缘入射角沿叶高的分布规律。从图 6(a)中可以看出,在转子进口入射角最小时,不同频率条件下,转子前缘入射角沿叶高分布规律相似,在轮毂处达到最小值,随叶高增加逐渐上升,在 80% 叶高时达到最大值,之后急速降低。并且,随着频率的增加,20%~80% 叶高曲线向右移,更靠近最佳入区;在图 6(b)中,可以看出,在最大转子进口入射角时,不同频率条件下,转子前缘入射角沿叶高分布相同,呈抛物线形状,在轮缘和轮毂位置达到最小值,在中间叶高位置达到最大值,且不同频率之间无差别。这与上述图 5 的分析是相对应的。

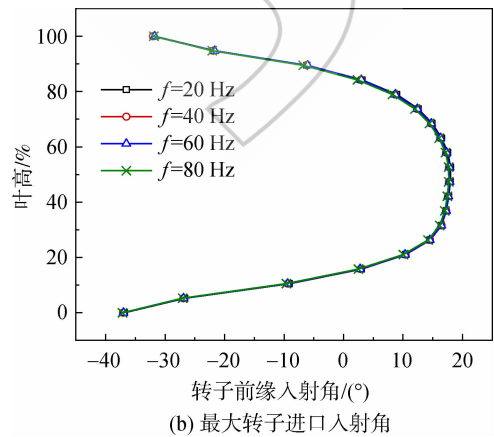
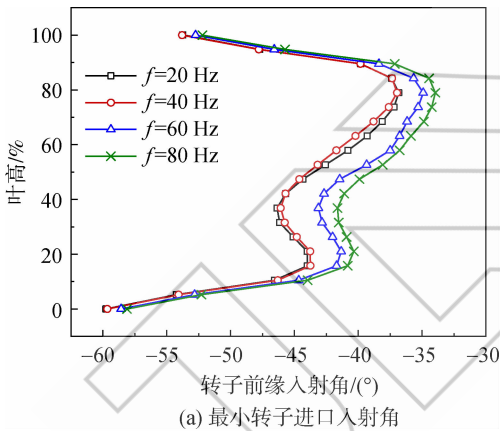


图 6 不同脉冲频率条件下转子叶片前缘入射角沿叶高分布规律

Fig. 6 Leading edge incidence angle over the blade span for different pulsating frequencies

为了直观地观察转子进口入射角对转子通道气流流动的影响,图 7 出示了脉冲频率为 40 Hz 条件下最大和最小转子进口入射角时转子通道不同弦长截面位置速度云图(周向距离蜗舌 180° 位置),SS 表示吸力面,PS 表示压力面。从图中可以看到由于此时不是转子进口最佳入射角,转子前缘压力面侧开始出现流动分离,造成低速区 A 和 A',随着气流向转子叶片通道下游流动,气体加速,到达 25% 弦长位置出现明显的分离涡团造成低速区 B 和 B',靠近轮毂侧的低速区 C,是由于在轮毂侧气体流通面积缩小快,压力面、吸力面以及轮毂端壁与气体之间的摩擦对气流影响增强。另外,已有的研究表明,在轮毂侧的气流中存在二次流动,这也是导致越靠近轮毂出现低速区的原因^[20]。对于最大转子进口入射角位置,在弦长 25% 处开始出现由转子叶片间隙泄漏引起的低速区 C',并随气流向下游运动逐渐扩大,可见转子前缘入射角对转子前缘及整个转子通道的气体流动影响很大。

图 8 出示了脉冲频率为 40 Hz 条件下最小和最大转子进口入射角时转子前缘流线分布及出口静熵分布(周向 180° 位置)。从图中可以看出,最大和最小转子进口入射角时,转子前缘都出现了明显的流动分离,如图中虚线圆区域所示。根据前面分析可知,最小转子进口入射角偏离最佳入射范围更远,从图 8(a)中也可以看出其流动分离现象更严重,并且随着气流向下游传播,分离流线越过叶片顶隙,与叶片顶隙泄漏流汇合,最终导致转子出口靠近叶片前缘吸力面侧的高熵区,但由于此时压力最低,因此对整体的涡轮性能影响较小;而对于最大转子进口入射角情况,其转子出口叶片前缘位置的高熵区主要是由叶片顶隙间隙泄漏造成的。

2.2 脉冲频率对转子进口周向气流角的影响

为了比较稳态和脉冲气流进气的周向气流角分布,选择 20 Hz 的频率进行对比,因为此频率下具有最小压力波反射和叠加痕迹。选择了喷嘴环进口压力 p 的中间压力,即脉冲进气条件下相同压力值的上升段和下降段位置 p_{t2} 和 p_{t4} 与稳态工况点 p_{t1} ,另外,还选择了脉冲条件下最大压力位置 p_{t3} 进行比较。图 9 出示了稳态和非稳态分析工况点位置。需要注意的是,稳态数值计算是进气为均匀气流的非定常计算,非稳态数值计算为脉冲进气的非定常计算。

图 10 出示了稳态与非稳态条件转子进口周

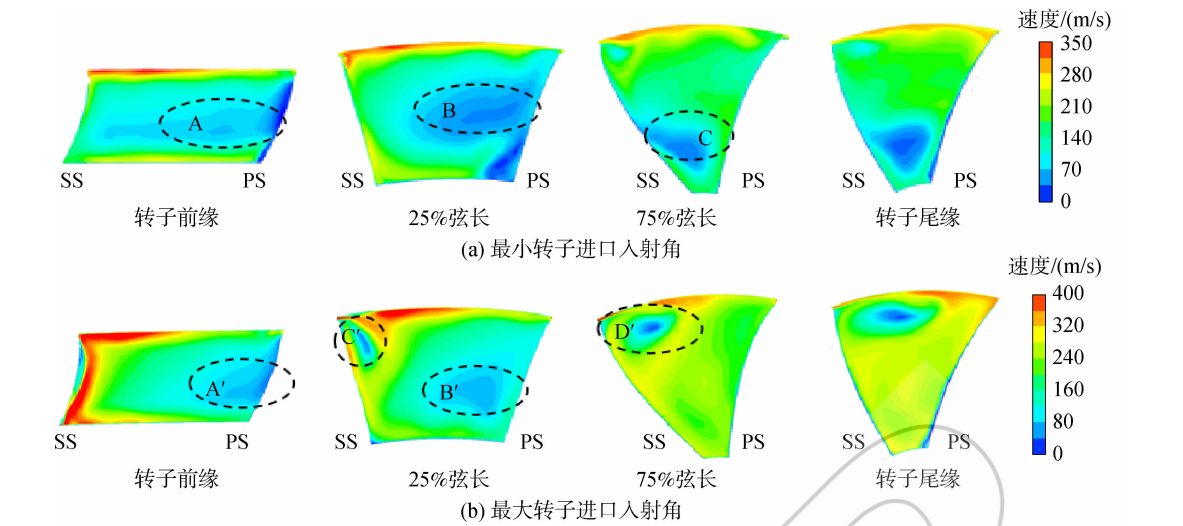


图 7 脉冲频率 40 Hz 条件下转子通道不同弦长截面位置速度云图(周向 180°位置)

Fig. 7 Velocity contours on a constant stream-wise plane at different chords and pulsating frequency of 40 Hz (passage position is 180° from tongue)

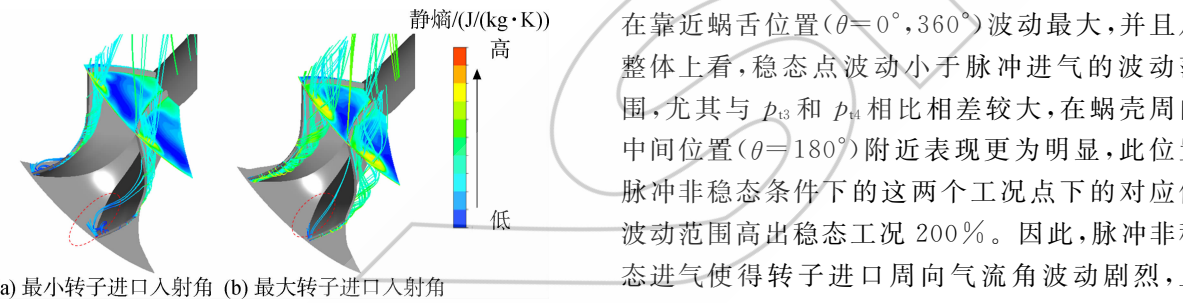


图 8 脉冲频率 40 Hz 条件下转子前缘流线分布及出口静熵分布(周向 180°位置)

Fig. 8 Flow line distribution at leading edge and outlet static entropy distribution at pulsating frequency of 40 Hz (passage position is 180° from tongue)

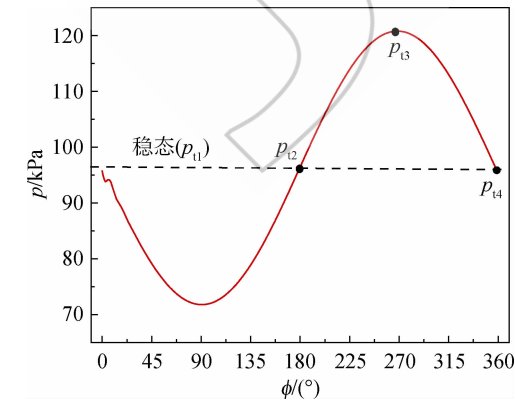


图 9 稳态和非稳态分析的工况点位置($f=20$ Hz)

Fig. 9 Steady and unsteady points for flow field analysis ($f=20$ Hz)

向位置(θ)的绝对气流角(α)的分布规律。可以看出,稳态工况点(p_{13})的转子进口绝对气流角

在靠近蜗舌位置($\theta=0^\circ, 360^\circ$)波动最大,并且从整体上看,稳态点波动小于脉冲进气的波动范围,尤其与 p_{13} 和 p_{14} 相比相差较大,在蜗壳周向中间位置($\theta=180^\circ$)附近表现更为明显,此位置脉冲非稳态条件下的这两个工况点下的对应值波动范围高出稳态工况 200%。因此,脉冲非稳态进气使得转子进口周向气流角波动剧烈,且相同压力情况下,上升沿和下降沿的波动规律也不同。

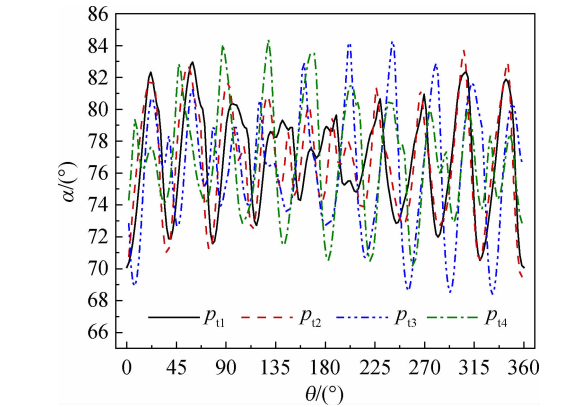


图 10 稳态与非稳态条件下转子进口绝对气流角分布对比

Fig. 10 Absolute flow angle plot at the rotor inlet at the steady and unsteady conditions

为了对不同脉冲频率条件下涡轮进口周向气流角分布进行分析,需要选择一个合适的压力水平以避免由于脉动气流的反射和叠加而引起压力波动,因此,此处分析的压力水平低于之前分析所

用的中间压力。图 11 出示了在压力上升时,不同脉冲频率下转子进口处的绝对气流角(α)和相对气流角(β)的周向分布规律。通过图 11(a)可以发现一个有趣的现象:频率为 20 Hz 和频率为 60 Hz 所对应的绝对气流角周向分布及其相似,而频率为 20、40、60 Hz 对应的分布规律相似,都呈现两端高,中间低的分布态势,只有 80 Hz 的对应的绝对气流角波动与其他频率不同,这是由于高频压力波的反射和叠加效应造成的。同时 4 种条件下的转子进口绝对气流角的波动范围基本相同,都在 $72^{\circ}\sim 83^{\circ}$ 之间,可见脉冲频率对转子进口绝对气流角的波动程度影响较小。这是由于通过导叶部分气流发生合并,导叶引导气流进入特定角度。

评价,表 2 出示了不同频率条件下转子进口周向相对气流角的平均值与标准差(压力上升)。从表 2 可以发现只有频率 60 Hz 的对应的平均值与其他 3 个频率相差较大,且标准差也较大,说明其波动幅度较大。而其他 3 个频率对应的均值和标准差基本在同一水平,说明其波动情况基本相同。

表 2 不同频率条件下转子进口相对气流角平均值与标准差(压力上升)

Table 2 Mean and standard deviation of relative flow angle for all frequencies (pressure increment instance)		
脉冲频率/Hz	转子进口相对气流角/($^{\circ}$)	
	平均值	标准差
20	-24.95	7.25
40	-27.56	6.68
60	-13.23	9.16
80	-27.22	7.10

对压力下降情况,进行了相同的分析,图 12 出示了在压力下降时,不同脉冲频率条件下转子进口的绝对气流角和相对气流角的周向分布情况。从图 12(a)可以发现,在压力下降时,不同频率条件下转子进口绝对气流角分布规律相似,只有频率为 40 Hz 的对应值略显不同;对于图 12(b),所有频率对应的相对气流角分布规律相似,只有 80 Hz 对应值略显不同。表 3 出示了不同频率条件下转子进口周向相对气流角的平均值与标准差(压力下降)。与表 2 对比,可以发现压力下降时,不同频率对应的标准差更接近,说明压力下降时的,频率对周向相对气流角的波动不稳定性影响较小。

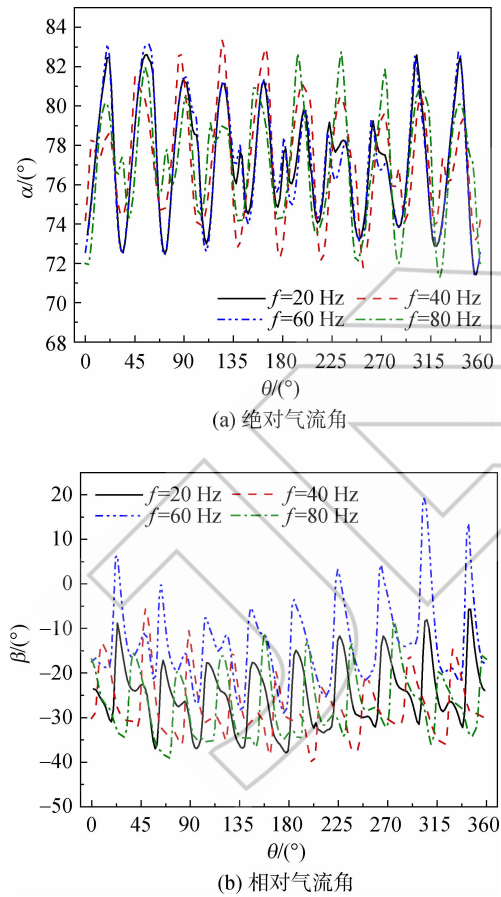
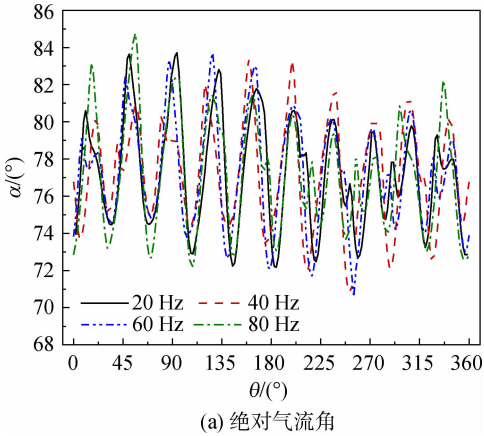


图 11 不同脉冲频率条件下转子进口气流角分布 (压力上升)

Fig. 11 Flow angle at rotor inlet for all pulsating frequencies (pressure increment instances)

对于图 11(b),可以发现不同频率条件下转子进口相对气流角周向分布规律明显不同,频率为 60 Hz 的对应值波动幅度最大,其他频率波动幅度相差不多。为了对其波动情况进行综合



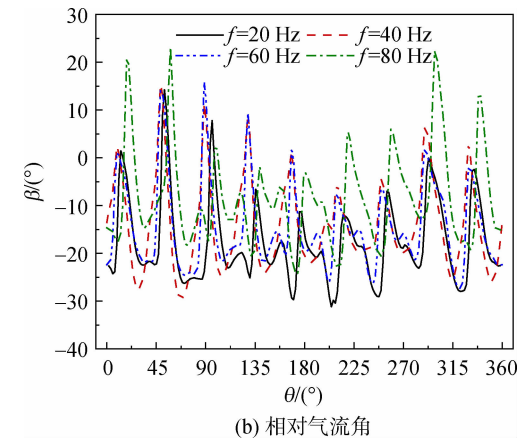


图 12 不同脉冲频率条件下转子进口气流角分布 (压力下降)

Fig. 12 Flow angle at rotor inlet for all pulsating frequencies (pressure decrement instances)

表 3 不同频率条件下转子进口相对气流角平均值与标准差 (压力下降)

Table 3 Mean and standard deviation of relative flow angle during pressure decrements instance for all frequencies

频率/Hz	平均值/(°)	标准/(°)
20	-17.63	8.54
40	-13.99	9.42
60	-14.33	9.01
80	-8.53	9.80

3 结 论

本文研究了脉冲进气条件下涡轮增压器涡轮转子进口的流动特性,通过对脉冲频率为 20、40、60 Hz 和 80 Hz 条件下的涡轮非稳态计算,分析了脉冲频率对涡轮转子进口气流角和流场分布的影响,可以得出以下结论:

1) 在脉冲循环低压侧,频率越低,转子进口入射角越小;高压侧,频率对其影响较小。在最小转子进口入射角时,转子进口入射角沿叶高方向分布规律相似;在最大转子进口入射角时,转子进口入射角分布规律相同,呈抛物线形状。因此,在高压条件下对径向涡轮转子进行优化可以使涡轮在大范围的脉动进气环境中提供最佳性能。

2) 在最大和最小转子进口入射角时,涡轮转子前缘都出现了明显的流动分离现象,致使转子进口靠近压力面侧出现明显的低速区,并且最小转子进口入射角对应的涡轮转子前缘流动分离现

象更明显。

3) 在周向 180°位置附近,脉冲进气条件下的气流角波动幅度高出其稳态对应值的 200%;无论脉冲情况如何(压力上升或下降)以及频率如何变化,转子进口绝对气流角的分布规律基本相似,波动范围基本相同,而转子进口相对气流角分布在压力下降时更为稳定。

参考文献:

[1] WATSON N, JANOTA M S. Turbocharging the internal combustion engine [M]. London: The Macmillan Press, 1982.

[2] JAPIKSE D, BAINES N C. Introduction to turbomachinery [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1994.

[3] KARAMANIS N, MARTINEZ-BOTAS R F, SU C C. Mixed flow turbines; inlet and exit flow under steady and pulsating conditions [J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 123(2): 359-371.

[4] KARAMANIS N, MARTINEZ-BOTAS R F. Mixed-flow turbines for automotive turbochargers: steady and unsteady performance [J]. International Journal of Engine Research, 2002, 3(3): 127-138.

[5] YU Liguang, MA Chaochen, SHI Xin, et al. Experimental investigation on vehicular turbocharger turbine characteristics under unsteady flow condition [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(5): 36-40.

[6] PALFREYMAN D, MARTINEZ-BOTAS R F. The pulsating flow field in a mixed flow turbocharger turbine: an experimental and computational study [J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1): 144-155.

[7] COSTALL A, MARTINEZ-BOTAS R F, PALFREYMAN D. Detailed study of pulsating flow performance in a mixed flow turbocharger turbine [R]. ASME Paper GT2005-68828, 2005.

[8] YANG Mingyang, DENG Kangyao, MARTINES-BOTAS R, et al. An investigation on unsteadiness of a mixed-flow turbine under pulsating conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 110: 51-58.

[9] PADZILLAH M H, RAJOO S, MARTINEZ-BOTAS R F. A detailed comparison on the influence of flow unsteadiness between the vaned and vaneless mixed-flow turbocharger turbine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(4): 042601. 1-042601. 15.

[10] LEE S P, REZK A, JUPP M L. The influence of pulse shape on the performance of a mixed flow turbine for turbocharger applications [J]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2018, 7(2): 136-142.

[11] LEE S P, JUPP M L, BARRANS S M, et al. Analysis of leading edge flow characteristics in a mixed flow turbine under pulsating flows [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(1): 78-95.

[12] HU Chenxing, YANG Ce, SHI Xin, et al. Investigation of rotating stall in radial vaneless diffusers with asymmetric inflow[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 96: 105546. 1-105546. 13.

[13] 吉冰, 李军, 王志多. 脉动来流对涡轮非定常气动性能影响机理[J]. 航空动力学报, 2020, 35(2): 191-202.

JI Bing, LI Jun, WANG Zhiduo. Effect mechanism of pulsating flow on unsteady aerodynamic performance of turbine[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(2): 191-202. (in Chinese)

[14] 周杨, 张扬, 苏欣荣, 等. 进口旋流周向位置对高压涡轮进口导叶气动特性的影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 402-410.

ZHOU Yang, ZHANG Yang, SU Xinrong, et al. Effect of pitchwise position of inlet swirl on aerodynamic characteristics of high-pressure turbine IGV[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(2): 402-410. (in Chinese)

[15] DALE A, WATSON N. Vaneless radial turbocharger turbine performance[C] // Proceedings of the 3rd IMechE Conference on Turbocharging and Turbochargers. London: Mechanical Engineering Publications Limited, 1986: 65-76.

[16] QI Mingxu, LEI Xinguo, WANG Zhen, et al. Investigation on the flow characteristics of a VNT turbine under pulsating flow conditions[J]. Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(2): 396-412.

[17] HELLSTRÖM F. Numerical computations of the unsteady flow in a radial turbine[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2008.

[18] CERDOUN M, GHENAIET A. Unsteady behavior of a twin entry radial turbine under engine like inlet flow conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130(2): 93-111.

[19] WANG Zhihui, MA Chaochen, HUANG Zhi, et al. A novel variable geometry turbine achieved by elastically restrained nozzle guide vanes[J]. Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(9): 2312-2329.

[20] MOUSTAPHA H, ZELESKY M F. Axial and radial turbines[M]. White River Junction, US: Concepts NREC, 2003.

(编辑: 陈 越)