

文章编号:1000-8055(2013)09-2121-08

脉冲进气条件下可变喷嘴涡轮性能 影响因素分析

张 锐, 施 新, 杨 策, 马朝臣, 祁明旭
(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 为了改善涡轮和发动机的匹配,采用计算流体动力学(CFD)方法研究了脉冲进气条件下脉冲频率、脉冲振幅、喷嘴角度以及涡轮转速对可变喷嘴涡轮非定常性能的影响。研究表明:脉冲频率为 80 Hz 时涡轮瞬态最低流量比 40 Hz 时提高了 10.4%,瞬态最低效率增加了 4.7%,效率滞后现象更加明显;低脉冲振幅为 25 kPa 时涡轮通流能力和效率迅速恢复,并且指出在低脉冲振幅时采用稳态设计是可行的;喷嘴角度为 32°时,涡轮脉冲进气与稳态进气两种情况下的流量差异比喷嘴角度为 10°时增加了 3.3%,效率差异则增加了 6.6%。涡轮内部脉动强烈,涡轮通流能力和效率下降明显;涡轮转速为 47 256 r/min 时脉冲进气造成的流量和效率变化分别比 30 000 r/min 时相应值高了 2.9%和 0.8%。高转速时涡轮内部流场易受到进口条件影响,涡轮流量、效率以及攻角与稳态情况偏离大。

关 键 词: 脉冲进气;可变喷嘴涡轮;频率;振幅;非稳态

中图分类号: V231.3;TK474

文献标志码: A

Analysis on variable nozzle turbine performance influenced by multiple factors under pulsating flow conditions

ZHANG Rui, SHI Xin, YANG Ce, MA Chao-chen, QI Ming-xu

(School of Mechanical Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To improve the matching between the turbine and engine, computational fluid dynamics (CFD) methods were adopted to investigate the unsteady performance of variable nozzle turbine influenced by pulsating flow frequency, pulsating flow amplitude, nozzle vane angle and turbine rotating speed. Results show that the turbine instantaneous minimum mass flow rate under 80 Hz condition is 10.4% higher than that under 40 Hz condition, and the lowest efficiency increases by 4.7%. At high pulsating frequency, the unsteady efficiency apparently lags behind velocity ratio. Under pulsating amplitude of 25 kPa condition, the swallow capacity and efficiency recover rapidly, indicating that it is possible to design turbines by steady flow hypothesis under low amplitude conditon. For nozzle angle of 32 degree, the mass flow difference between pulsating inlet flow condition and steady inlet flow condition is 3.3% more than that of 10 degree, and the efficiency difference is 6.6% more. Higher nozzle angle makes turbine flow field more pulsative and results in mass flow rate and efficiency dropping significantly. Under turbine rotating speed of 47 256 r/min con-

收稿日期:2012-09-14

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130926.1103.201309.2121_017.html

基金项目:国家自然科学基金(51276018)

作者简介:张锐(1986—),男,四川南充人,博士生,主要从事内燃机增压技术及叶轮机械气动热力学研究。

dition, the mass flow rate and efficiency variation caused by pulsating inlet flow is 2.9% and 0.8% more compared to that of 30000r/min. The turbine flow field is more sensitive to turbine inlet condition when rotating speed is high, and the mass flow rate, efficiency and attacking angle deviate from equivalent steady values.

Key words: pulsating flow; variable nozzle turbine; frequency; amplitude; unsteady

研究脉冲进气条件下的可变喷嘴涡轮性能有利于改善涡轮与发动机的匹配. 通常,在进行涡轮设计时假定涡轮内部气流是稳定的,但是实际上,涡轮上游的活塞式发动机的排气是脉冲变化的^[1],这就造成了涡轮一直处于非稳定工作状态. 并且,随着发动机转速和负荷的变化,涡轮进口脉冲气流的频率和压力幅值也是不断变化的. 同时,脉冲进气条件与可变喷嘴涡轮喷嘴角度变化以及涡轮转速变化的复合作用也给涡轮性能带来新的影响.

回顾脉冲进气对涡轮非定常特性影响的研究现状,可以发现国内外学者已经做了一些工作. Yeo 等^[2]使用双焦点激光测速仪测量了径流涡轮转子进出口流场,发现转子进口绝对速度波动与涡轮级进口压力脉冲相对应,而攻角变化则刚好相反. 另外, Baines 等^[3]还通过试验研究了涡轮转速和脉冲频率对涡轮特性的影响. Rajoo^[4]则从脉冲频率和喷嘴角度两个方面分析了对涡轮性能的影响,发现高脉冲频率以及大喷嘴角度条件下涡轮内部的脉冲更强烈. Abidat^[5]使用一维计算模型研究了脉冲频率和幅值对无叶混流涡轮的影响,发现脉冲频率对平均流量没有明显影响,而脉冲幅值对平均流量有大的影响. Palfreyman 等^[6-7]以及 Chen 等^[8]通过三维计算模型研究了涡轮内部流场,发现了在脉冲进气条件下转子内部强烈的非定常流动现象.

本文在前人的基础上,利用 CFD 方法^[9]全面地研究脉冲频率、压力幅值、喷嘴角度和涡轮转速对涡轮宏观特性及攻角损失^[10]的影响.

1 数值方法

1.1 几何模型

本文的计算对象采用本课题组研发的 JK90S 可变喷嘴涡轮,其子午面形状如图 1 所示. 其中,喷嘴叶片数为 15 个,喷嘴角度变化范围为 $6^{\circ} \sim 32^{\circ}$,转子叶片数为 10 个,前缘直径为 83.5 mm,尾缘直径为 73.5 mm,转子入口叶片角为 0° ,转子出口平均半径位置叶片角为 56° ,叶顶间隙为

0.6 mm^[11]. 然而,由于脉冲进气条件下非稳态计算对计算资源的要求极高,在本计算中仅考虑了针对喷嘴和转子的计算. 即使在简化的情况下,一个工况点的数据文件也达到 300 GB.

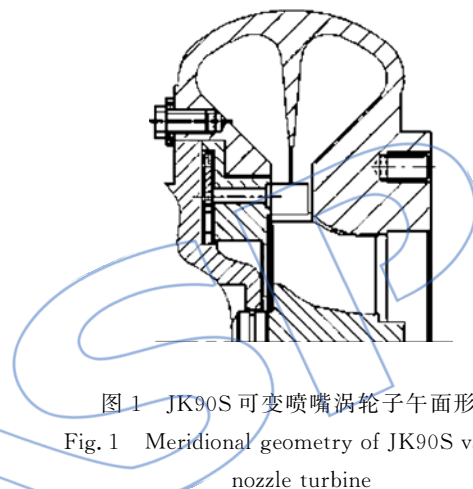


图1 JK90S 可变喷嘴涡轮子午面形状

Fig. 1 Meridional geometry of JK90S variable nozzle turbine

1.2 网格及算法

利用软件 NUMECA 中的 Autogrid 模块生成喷嘴叶片及转子叶片网格,同时,根据叶片约化法,可以得到如图 2 所示的计算网格. 其中,单个喷嘴叶片网格数为 15 万,单个转子叶片网格数为 24 万.

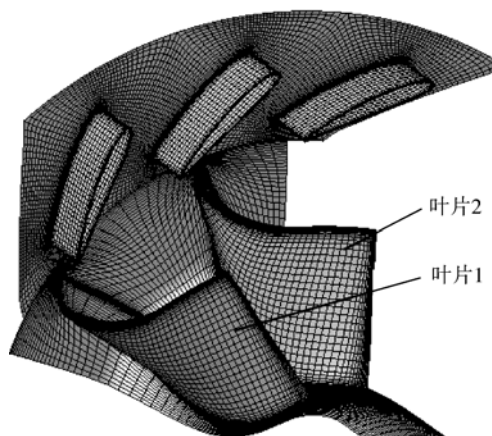


图2 JK90S 可变喷嘴涡轮计算网格

Fig. 2 Computational grids of JK90S variable nozzle turbine

数值计算采用 NUMECA 商用软件包求解三维非定常 Navier-Stokes 方程组,应用格子中心有限体积法,空间差分采用中心差分格式,时间项采用 4 阶 Runge-Kutta 法迭代求解.湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型.为加速收敛,采用了残差光滑法和多重网格技术.内迭代采用双时间步长.喷嘴进口边界条件采用变化的总压总温及恒定的速度方向,转子出口边界条件采用恒定静压即 1 个标准大气压力(约为 1.013×10^5 Pa)边界条件.固壁采用无滑移、不渗透、绝热边界条件.

为了清楚地研究脉冲进气条件下单一因素对涡轮性能的影响,在图 3 中,不同振幅和频率的按正弦规律变化的模拟压力和温度值取代了试验测量值.通常,径流涡轮性能研究是在冷吹试验条件下进行的.在这里,数值模拟计算与冷吹试验一样,保证相似转速不变.在设计工况下,喷嘴进口总压为 185 kPa,平均总温为 318 K,涡轮转速为 47 256 r/min,喷嘴角度为 20° ,涡轮相似转速为 $2650 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{K}^{0.5})$,涡轮速比为 0.70.将设计工

况下的进口总压和总温分别作为脉冲周期内的平均总压和平均总温^[12],瞬态总压 p_t 可根据式(1)求得

$$p_t = p_{av} - A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

其中 p_{av} 为平均总压, A 为振幅, f 为频率, t 为时间.对于不同进口条件,振幅分别为 50, 25 kPa, 频率分别为 20, 40, 60 Hz.另根据管道流动中流体温度和压力的等熵关系,可以根据式(2)得到瞬态总温 T_t

$$T_t/T_{av} = (p_t/p_{av})^{(\kappa-1)/\kappa} \quad (2)$$

其中 T_{av} 为平均总温, κ 为等熵指数.

同时,为了研究喷嘴角度、涡轮转速与脉冲进气条件复合作用对涡轮性能的影响,使用了 3 种不同喷嘴角度网格以及 2 个不同转子转速.喷嘴角度包括 10° , 20° , 32° , 转子转速包括 47 256, 30 000 r/min.

1.3 软件验证

为了增加软件模拟结果的可信度,在图 4 中给出了涡轮设计转速下的涡轮特性试验结果^[13].

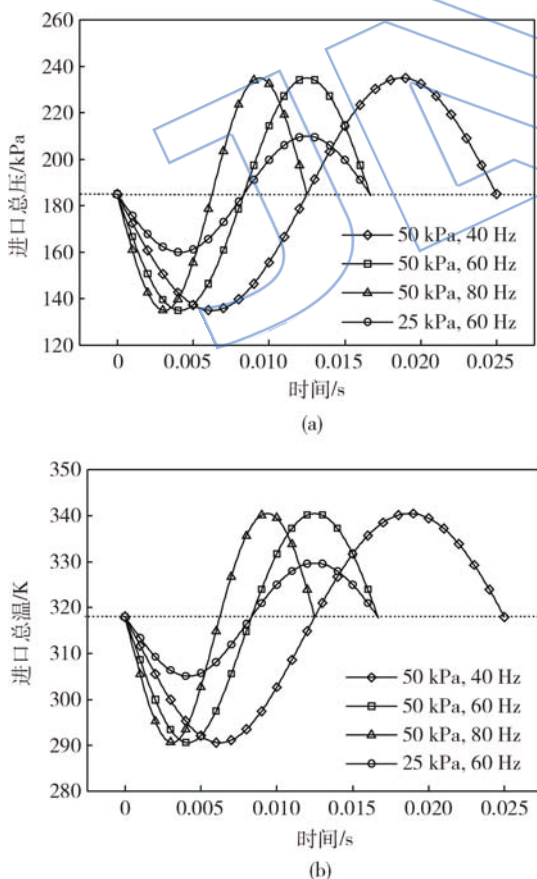


图3 进口总压和总温的数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation of total pressure and total temperature of inlet

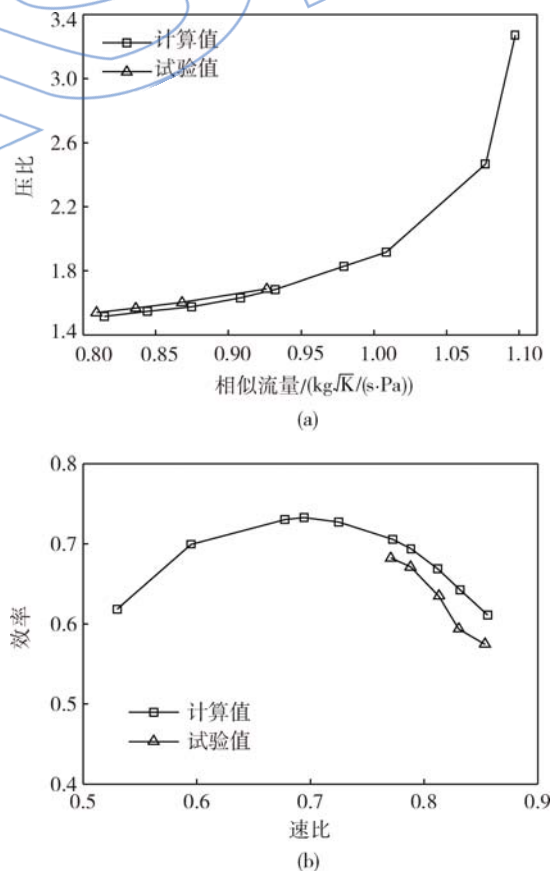


图4 涡轮特性——软件的试验验证

Fig. 4 Software verification for turbine experimental performance

通过对比试验结果与数值计算结果,可以发现,在涡轮流量特性上,计算值和试验值吻合很好;在涡轮的效率特性上,计算值比试验值高 2%~4%。总的来说,对于研究对象 JK90S,采用 NUMECA 计算软件可以正确模拟涡轮内部的流动特征。

2 涡轮特性计算结果分析

为了分析脉冲进气条件下各因素对涡轮特性的影响,需要将非定常计算得到的循环平均流量和循环平均效率与对应的平均总压总温条件下的稳态计算进行对比。在表 1 中,列出了平均总压总温条件下的稳态计算结果。其中 ω 代表涡轮转速, Θ 代表喷嘴角度, M_{av} 和 η_{av} 分别代表平均总压总温条件下的流量和效率。

表 1 涡轮稳态计算结果

Table 1 Turbine steady computational results

$\omega/(r/min)$	$\Theta/(^\circ)$	$M_{av}/(kg/s)$	η_{av}
47 256	10	0.421 7	0.764 5
47 256	20	0.550 4	0.723 0
47 256	32	0.601 3	0.593 8
30 000	20	0.566 6	0.581 4

2.1 脉冲频率影响

在表 2 中,列出了涡轮转速为 47 256 r/min,喷嘴角度为 20°,脉冲振幅为 50 kPa 时,不同脉冲频率的非稳态计算结果。其中 $M_{c,av}$ 代表循环平均流量, $\eta_{c,av}$ 代表循环平均效率, ΔM 和 $\Delta \eta$ 分别代表流量变化百分比以及效率变化百分比,它们都是与平均总压总温条件下稳态计算结果进行比较得到的。通过该表可以发现,脉冲气流造成了涡轮流通能力下降,涡轮效率降低。然而,脉冲频率变化几乎不会影响涡轮循环平均流量和效率。在图 5 中,给出了不同脉冲频率下的涡轮特性曲线。可以发现,在流量特性曲线中,大压比端(瞬态压力高于平均压力)流量变化几乎重合,而在小压比端(瞬态压力低于平均压力)流量变化为圈状。在高频率时,流量的最小值更大,而滞后圈的范围更大。在效率特性曲线中,在小速比端效率变化相对大速比端小得多。同时,也可发现高频率时最低效率更大,而效率滞后圈也更大。另外,由于叶轮转动带来的动静干涉影响,叶轮输出扭矩是不断变化的,所以效率曲线是不断高频变化的。特别是在涡轮进气压力较低的阶段,即大速比阶段,效率波

动十分剧烈。但是,动静干涉作用传播到喷嘴进口时已经变弱很多,所以在流量特性曲线中没有出现流量的高频大幅值变化。

表 2 不同脉冲频率涡轮循环平均性能

Table 2 Turbine cycle-averaged performance with different pulsative frequencies

f/Hz	$M_{c,av}/(kg/s)$	$\eta_{c,av}$	$\Delta M/\%$	$\Delta \eta/\%$
40	0.515 2	0.681 2	-6.4	-5.8
60	0.515 7	0.681 3	-6.3	-5.8
80	0.516 3	0.681 4	-6.2	-5.7

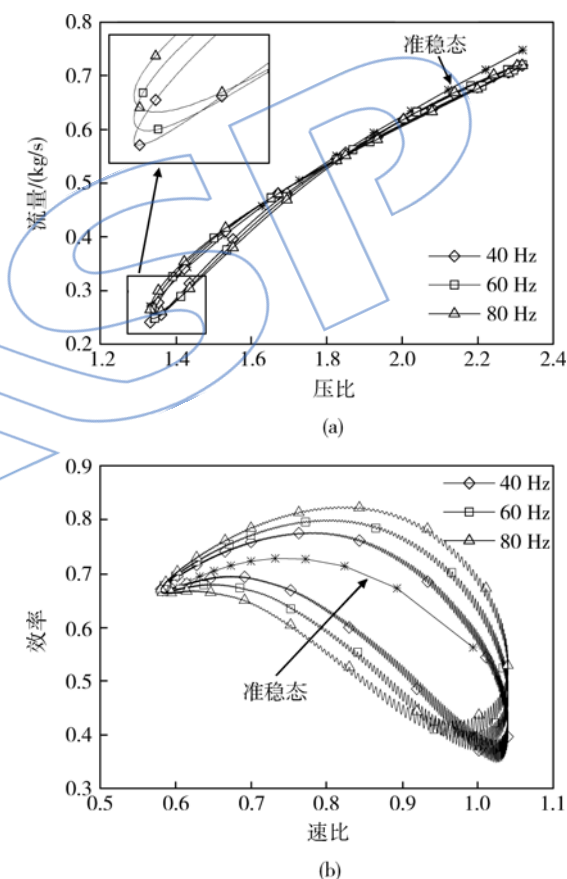


图 5 不同脉冲频率的涡轮特性

Fig. 5 Turbine characteristics with different pulsative frequencies

综上所述,当喷嘴进口处于小压力和高频率时,涡轮内部的脉动情况更剧烈。

2.2 脉冲振幅影响

表 3 列出了涡轮转速为 47 256 r/min,喷嘴角度为 20°,脉冲频率为 60 Hz 时,不同脉冲振幅的非稳态计算结果。可以发现,小振幅时涡轮循环平均性能与平均总压总温条件下的稳态涡轮性能的

差异明显减小,这说明了小振幅时涡轮内部的脉动作用大大削弱.在图 6 中,给出了不同脉冲振幅下的涡轮特性曲线.可以发现,在低振幅情况下,在一个脉冲周期内的涡轮效率变化幅度和范围与高振幅时差别很大.这说明了脉冲进气条件下,压力变化振幅对涡轮特性具有重要影响.从工程角度看,当涡轮进口最高压力和最低压力差别不大时采用稳态设计是可行的.

表 3 不同脉冲振幅涡轮循环平均性能

Table 3 Turbine cycle-averaged performance with different pulsative amplitudes

A/ kPa	$M_{c,av}$ / (kg/s)	$\eta_{c,av}$	$\Delta M/\%$	$\Delta \eta/\%$
50	0.5157	0.6813	-6.3	-5.8
25	0.5402	0.7150	-1.9	-1.1

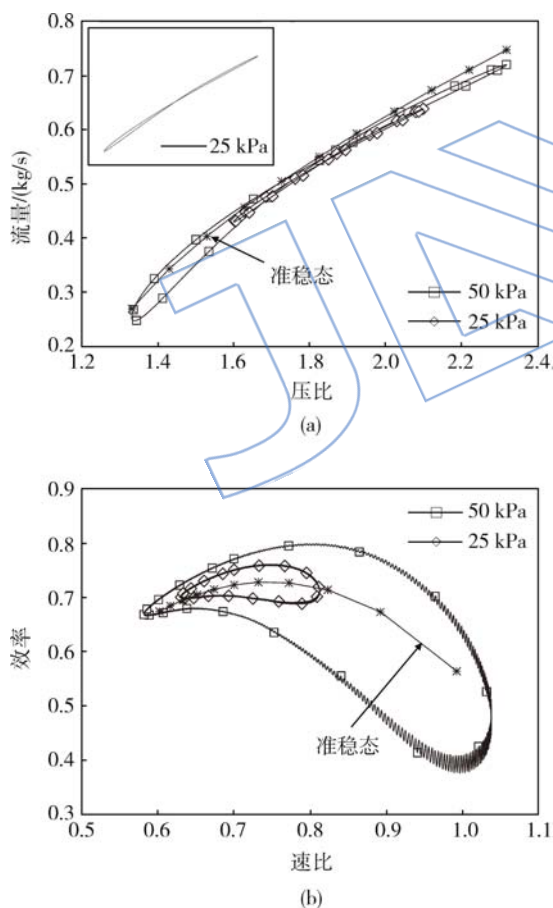


图 6 不同脉冲振幅的涡轮特性

Fig. 6 Turbine characteristics with different pulsative amplitudes

2.3 喷嘴角度影响

在表 4 中,列出了涡轮转速为 47 256 r/min,

脉冲频率为 60 Hz,脉冲振幅为 50 kPa 时,不同喷嘴角度的非稳态计算结果.通过该表可以发现,随着喷嘴角度增大,脉冲进气情况下的循环平均流量和效率与平均总压总温条件下稳态计算结果差异越来越大.这说明在大喷嘴角度情况下,涡轮内部的脉冲情况更加强烈.在图 7 中,给出了不同喷嘴角度下的涡轮特性曲线.可以发现,当喷嘴角度为 32°时,涡轮非稳态计算的效率曲线已经几乎全部处于准稳态曲线下.同时,随着喷嘴角度增大,在大速比端高效率波动的幅值增大.造成这种

表 4 不同喷嘴角度的涡轮循环平均性能

Table 4 Turbine cycle-averaged performance with different nozzle angles

$\Theta/(^{\circ})$	$M_{c,av}$ / (kg/s)	$\eta_{c,av}$	$\Delta M/\%$	$\Delta \eta/\%$
10	0.4038	0.7384	-4.2	-3.4
20	0.5157	0.6813	-6.3	-5.8
32	0.5563	0.5343	-7.5	-10.0

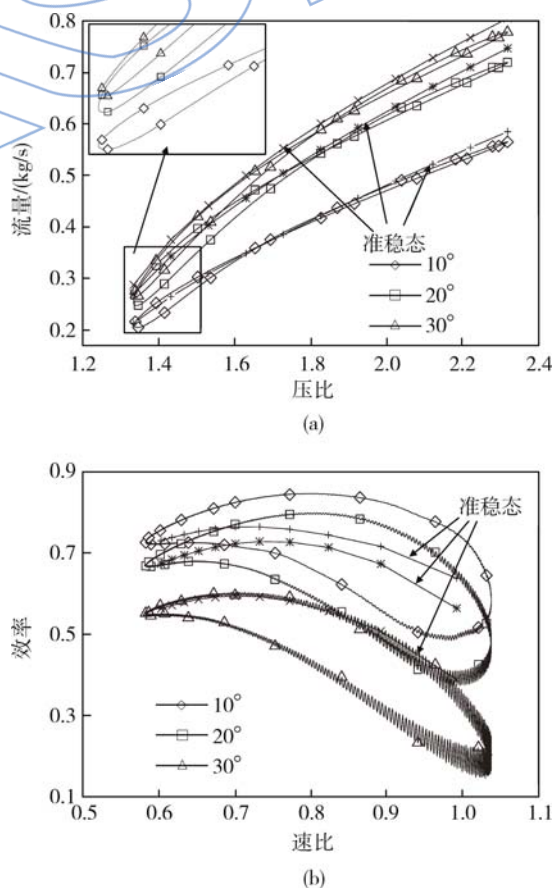


图 7 不同喷嘴角度的涡轮特性

Fig. 7 Turbine characteristics with different nozzle angles

现象的原因在于喷嘴角度增大使得喷嘴叶片尾缘和转子叶片前缘的距离减小,从而使得动静干涉作用增强。

2.4 涡轮转速影响

表5列出了喷嘴角度为 20° ,脉冲频率为60 Hz,脉冲振幅为50 kPa时,不同涡轮转速的非稳态计算结果.通过该表可以发现,在高速时,脉冲进气造成的流量变化更明显.图8给出了不同转速的涡轮特性曲线.可以发现,当涡轮转速为30 000 r/min时,速比介于0.37~0.66,速比值相

表5 不同转速涡轮循环平均性能

Table 5 Turbine cycle-averaged performance with different rotational speeds

$\omega/$ (r/min)	$M_{c,av}/$ (kg/s)	$\eta_{c,av}$	$\Delta M/\%$	$\Delta \eta/\%$
47 256	0.5157	0.6813	-6.3	-5.8
30 000	0.5474	0.5522	-3.4	-5.0

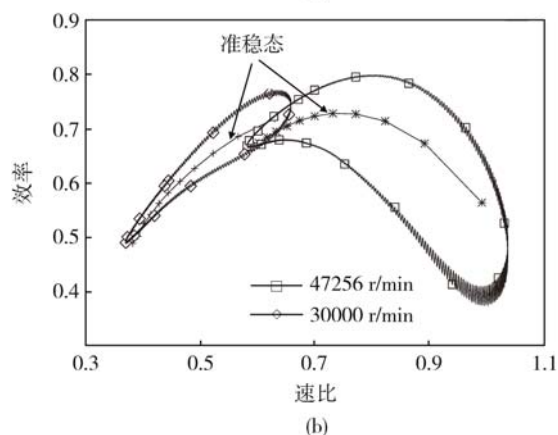
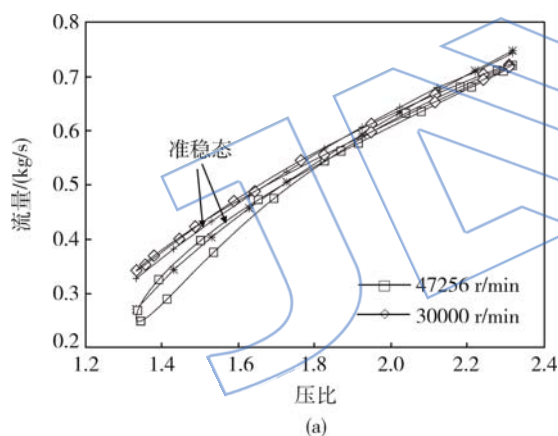


图8 不同转速的涡轮特性

Fig. 8 Turbine characteristics with different rotational speeds

对高速时小,非稳态效率曲线与准稳态差异较小.造成这个现象的原因可能在于,低速时涡轮转子叶片的载荷大,转子叶片表面的气流分离不易受到进口条件的影响。

3 攻角损失分析

在一个脉冲周期内,涡轮流量波动很大,从而使得进入转子叶片的相对气流角经常偏离最佳相对流动方向.在此种流动情况下,转子攻角损失是涡轮效率下降的主要原因^[14].

式(3)是NASA攻角损失模型.它指出了攻角损失 L_{in} 受到最优攻角偏离角 i 以及相对气流速度 W_{r1} 影响^[15].图9是稳态计算得到的设计转速下转子进口攻角和效率的关系.可以发现,最高效率区对应的最佳转子进口攻角处于 $-25^\circ \sim -35^\circ$.

$$L_{in} = 0.5 W_{r1}^2 \sin^a i \quad (3)$$

其中 i 为正数时 $a=3$, i 为负数时 $a=2$.

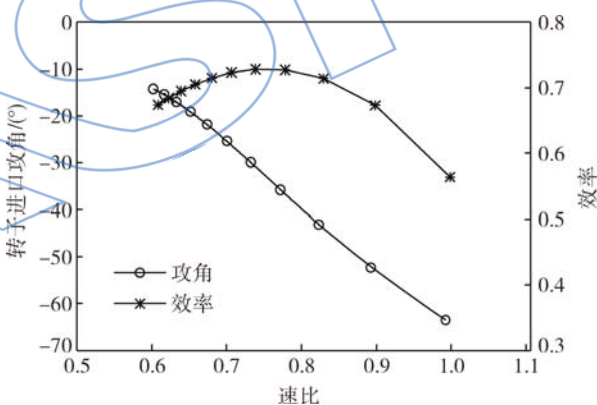


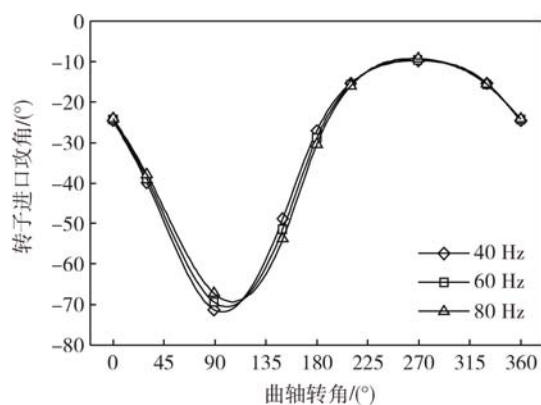
图9 转子进口攻角和效率关系

Fig. 9 Relationship between attack angle of rotor inlet and efficiency

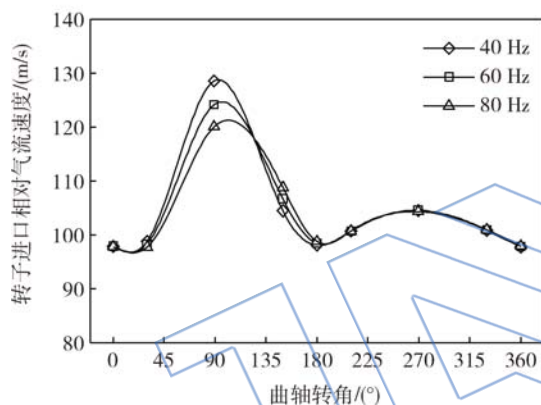
在图10中,给出了一个脉冲周期内不同脉冲频率转子进口攻角和相对气流速度变化情况.其中,一个脉冲周期用 360° 表示,其意义在于可以在相同范围内比较不同频率对涡轮内部各物理参数的影响.通过该图可以看出,脉冲周期在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内,转子进口攻角经历了从 $-70^\circ \sim -10^\circ$ 的变化,并且在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围即小压力端侧攻角变化更剧烈.脉冲周期在 90° 位置,40 Hz对应的转子进口负攻角和相对气流速度都最大,从而造成攻角损失大.这就解释了在图5效率特性曲线中,低脉冲频率情况下最低效率更小的原因.但是,由于不同脉冲频率的攻角损失差异是发生在

进口总压最低、涡轮可利用废气能量最小的时候, 所以不会对循环平均效率产生大的影响。

图 11 列出了不同脉冲振幅条件下转子进口攻角变化情况。其中, 进口总压振幅为 25 kPa 时



(a)



(b)

图 10 不同脉冲频率转子进口攻角和相对气流速度
Fig. 10 Attack angle of rotor inlet and relative velocity with different pulsative frequencies

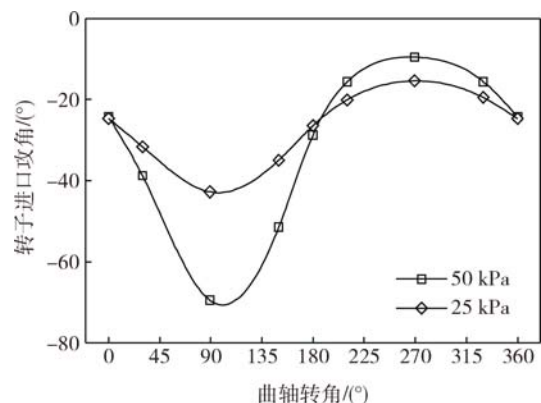
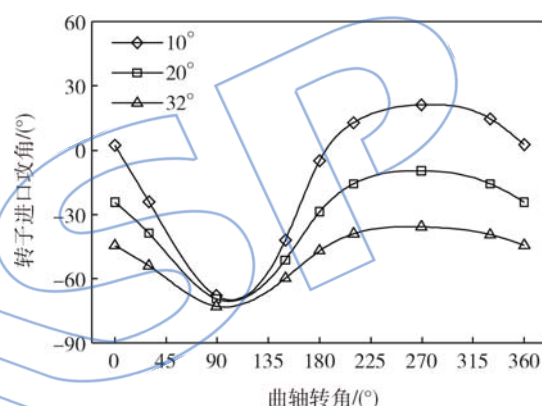


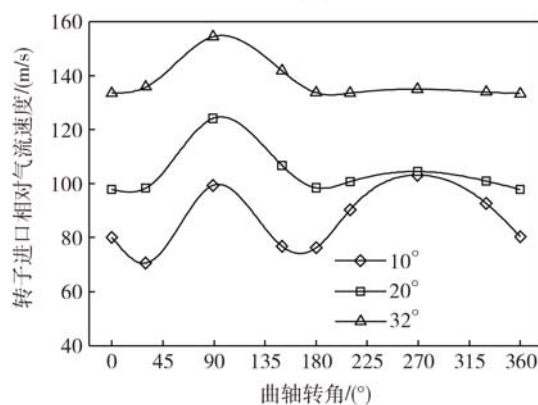
图 11 不同脉冲振幅转子进口攻角
Fig. 11 Attack angle of rotor inlet with different pulsative amplitudes

对应攻角范围为 $-15^{\circ} \sim -42^{\circ}$ 。该范围与前面提到的设计转速下的最优攻角范围接近, 所以涡轮的效率变化小。同时可以发现, 不同脉冲振幅对攻角的影响主要发生在脉冲周期内低于平均压力侧。该现象导致了图 6 中高脉冲振幅对应的涡轮效率在高速比端大幅波动。

在图 12 中, 列出了不同喷嘴角度下的转子进口攻角和相对气流速度变化情况。可以发现, 脉冲周期角度在 90° 位置, 不同喷嘴角度对转子进口攻角的影响最小, 而在其他位置则差别明显。当喷嘴角度为 32° 时, 攻角处于 $-36^{\circ} \sim -73^{\circ}$ 之间, 同时相对气流速度也较其他喷嘴角度时大得多, 所以攻角损失最大。



(a)



(b)

图 12 不同喷嘴角度转子进口攻角和相对气流速度
Fig. 12 Attack angle of rotor inlet and relative velocity with different nozzle angles

在图 13 中, 不但列出了不同涡轮转速条件下的转子进口攻角变化情况, 而且为了对比不同涡轮转速时脉冲进气带来的非定常影响因素, 将相应进口条件下的稳态计算结果绘制了出来。可以发现, 脉冲进气导致在低压侧转子进口攻角减小,

在高压侧转子进口攻角增大. 在高涡轮转速时, 脉冲进气情况与稳态情况差别更大.

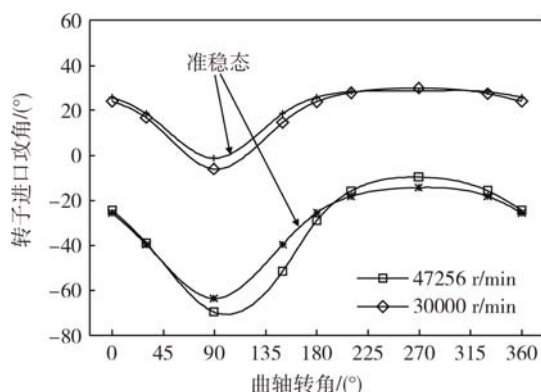


图13 不同涡轮转速转子进口攻角

Fig. 13 Attack angle of rotor inlet with different rotational speeds

4 结 论

本文通过数值模拟的方法研究了脉冲频率、脉冲振幅、喷嘴角度以及涡轮转速对脉冲可变喷嘴涡轮非定常性能的影响. 所得到的结论如下:

1) 高脉冲频率时涡轮最低效率更大, 效率滞后现象明显, 气流脉冲增强. 在涡轮进口压力较低时, 高脉冲频率所对应的攻角损失小.

2) 脉冲振幅越大, 涡轮内部脉冲越强, 涡轮通流能力和效率下降越多. 在一个脉冲循环内, 转子进口攻角变化范围随脉冲振幅增大而变宽, 攻角损失增加. 从工程意义上看, 低脉冲振幅时采用稳态设计是可行的.

3) 脉冲进气条件下, 大喷嘴角度时涡轮内部气流脉冲强烈, 涡轮通流能力和效率都下降很多. 同时, 喷嘴和转子的干涉增强, 高频效率波动的幅值增大. 大喷嘴角度时的转子攻角损失更大.

4) 在相同涡轮进口脉冲条件下, 高转速时涡轮内部气流易受到进口条件影响, 涡轮流量和效率下降多. 转子进口攻角更加偏离稳态情况.

参考文献:

[1] Baines N C. Fundamentals of turbocharging[M]. [S. l.]: Concepts NREC, 2005.
 [2] Yeo J H, Baines N C. Pulsating flow behaviour in a twin-entry vaneless radial-inflow turbine[J]. Institution of Mechanical Engineers (IMEchE), 1990, 405(4): 113-122.

[3] Baines N C, Hajilouy-Benisi A. The pulse flow performance and modelling of radial inflow turbines[J]. Institution of Mechanical Engineers (IMEchE), 1994, 484(6): 209-218.
 [4] Rajoo S, Martinez-Botas J. Unsteady effect in a nozzled turbo-charger turbine[R]. ASME Paper GT2007-28323, 2007.
 [5] Abidat M. Prediction of the steady and non-steady flow performance of a highly loaded mixed flow turbine[J]. Institution of Mechanical Engineers (IMEchE), 1998, 212(3): 173-184.
 [6] Palfreyman D, Martinez-Botas R F. The pulsating flow field in a mixed flow turbocharger turbine: an experimental and computational study[J]. Trans of ASME, 2005, 127(1): 144-155.
 [7] Costall A, Palfreyman D. Detailed study of pulsating flow performance in a mixed flow turbocharger turbine[R]. ASME Paper GT2005-68828, 2005.
 [8] Chen L, Zhuge W L. Investigation of flow structure in a turbocharger turbine under pulsating flow conditions[R]. SAE Paper 2008-01-1691, 2008.
 [9] 葛宁. 涡轮非定常流数值计算方法研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1066-1070.
 GE Ning. Evaluation of a numerical calculation method for unsteady flow in turbomachinery[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5): 1066-1070. (in Chinese)
 [10] 孙大伟, 乔渭阳. 不同攻角对涡轮叶栅损失的影响[J]. 航空动力学报, 2008, 23(7): 1232-1239.
 SUN Dawei, QIAO Weiyang. Influence of different incidences on loss in turbine cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(7): 1232-1239. (in Chinese)
 [11] 施新, 马朝臣. JK90S 可变喷嘴涡轮增压器试验研究[J]. 车用发动机, 2005, 160(6): 56-58.
 SHI Xin, MA Chaochen. Experimental study on JK90S variable nozzle turbocharger[J]. Vehicle Engine, 2005, 160(6): 56-58. (in Chinese)
 [12] 于立国. 车用涡轮增压器涡轮在脉冲进气条件下的非稳态特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008.
 YU Ligu. Investigation on turbine non-steady characteristics of automotive turbocharger under pulse flow conditions[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
 [13] 吕伟. 车用增压器可调涡轮喷嘴特性的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
 LÜ Wei. Characteristic investigation of vehicular turbo-charger variable geometry turbine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
 [14] 林建生, 谭旭光. 燃气轮机与涡轮增压内燃机原理及应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005.
 [15] 杨策, 施新. 径流式叶轮机械理论及设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.