

车用轴向调节式可变喷嘴增压器涡轮流场分析

卢隆辉^{1,3,4},张卫波²,刘建军^{1,3,4}

- (1. 三明学院 机电工程学院,福建 三明 365004; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350116;
3. 机械现代设计制造技术福建省高校工程研究中心,福建 三明 365004;
4. 绿色铸锻及高端零部件制造协同创新中心,福建 三明 365004)

摘要:以车用柴油机轴向调节式可变喷嘴增压器涡轮流场为研究对象,对增压器的不同工况进行试验,分析涡轮内部流场变化情况,研究高低速叶片对涡轮特性的影响。结果表明:完整气动叶型的低速叶片涡轮膨胀比大,气体的动能变化大,激波现象明显,有利于提高涡轮效率;不完整气动叶型的高速叶片工作时,使大流量气体能够快速通过涡轮区域,能量变化较平缓,膨胀比小,叶轮间隙处有明显泄漏现象,影响涡轮输出功率持续提高。

关键词:车用柴油机;可变喷嘴增压器;喷嘴叶片;涡轮;流场

中图分类号:TK421.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0047-04

Analysis of Turbine Field of Axial Adjustable Nozzle Turbocharger for Vehicle

LU Longhui^{1,3,4}, ZHANG Weibo², LIU Jianjun^{1,3,4}

- (1. School of Mechanical & Electronic Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China;
2. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, 350116, China;
3. Fujian Province Engineering Research Center of Mechanical Modern Design & Manufacture, Sanming 365004, China;
4. Collaborative Innovation Center of Green Casting-Forging Industry & High-End Parts, Sanming 365004, China)

Abstract: The turbine field of axial adjustable turbocharger of diesel engine for vehicle is studied, its operation in different working conditions is tested, the change of the internal field of the turbine is analyzed and the influence of high and slow speed blades on the flow field characteristics is studied. The results show that the whole pneumatic type of low-speed blade can be used to improve the expansion ratio, quickly change the kinetic energy and be the obvious shock-wave phenomena, thus improving the turbine efficiency; the incomplete pneumatic type of high-speed blade makes the mass of gas pass through the area of turbine quickly, thus transforming the energy smoothly, but some gas separation phenomenon appears in the turbine clearance, it affects the continuous improvement of the turbine output power.

Keywords: diesel engine for vehicle; adjustable nozzle turbocharger; nozzle blade; turbine; flow field

0 引言

相对自然吸气柴油机,采用涡轮增压器的柴油机在动力性、经济性和排放性能方面有较大的提高,但是,普通的增压器特性不能兼具柴油机在高低速工况下的性能要求^[1]。可变截面增压器技术通过改变增压器涡轮端的流通截面积参数,保证在低转速下增压器的输出压力和进气量,防止高转速下涡轮超速现象,使得增压器与柴油机在十分宽广的转速和负载工况下保持良好匹配关系^[2]。可变截面涡轮增压器的涡轮几何结构较为复杂,不同喷嘴叶片对进气气流状态的改变不同,其内部气体流动状态也非常复杂,属于三维湍流的非定常流动。可变截面涡轮增压器形式多样,其中轴向调节式可变喷嘴涡轮增压器具有结构简单、灵敏度高及控制可靠等优点^[3]。因此,对高低速工况下涡轮内部流场流动特性的研究,对于轴向式调节可

变喷嘴涡轮增压器的再设计、优化等具有重要的理论价值和指导意义。

国外学者 M.Capobianco 以不同类型的可变截面执行机构的增压器为对象,研究比较了自然吸气、可变截面涡轮端的流通特性及性能^[4];HIDEAKI T 等采用热线探针可对可变截面径流式涡轮增压器内部流场流速进行测试,结合数值模拟计算的方法对增压器涡轮流场情况进行分析^[5];STEVEN W. Burd 等对可变截面环状式喷嘴区域流场分布情况进行了分析^[6]。国内学者陈钢对可变截面涡轮增压器涡轮级进行数值模拟,通过流场分析预测了增压器的性能变化情况^[7];王航等采用数值分析方法对不同周向进气角工况下涡轮的性能及内部流场情况进行分析,掌握了涡轮的进气工作特性和内部流动损失机理^[8]。

本文对轴向可变涡轮增压器的喷嘴叶片及涡轮流场进行分析,依据涡轮增压器实验台架得到物理数据和数值仿真计算结果,研究典型的高低工况条件下高低速叶片对

基金项目:福建省中青年教育科研项目(JAT170528);福建省科技厅自然科学基金项目(2016J01741)

作者简介:卢隆辉(1988—),男,福建建宁人,讲师,硕士研究生,主要研究方向为汽车 CAE 分析。

涡轮及其流场特性的影响。

1 可变喷嘴结构及计算

1.1 轴向可调式喷嘴结构

增压器中的涡轮端高压、高温的排气通过蜗壳引导到喷嘴环,在喷嘴环中膨胀加速,进入涡轮腔推动涡轮叶片做功。该轴向式可变喷嘴涡轮增压器的喷嘴叶片安装在喷嘴环上,其中喷嘴叶片包括高速叶片和低速叶片。高速叶片类型为气动叶型,低速叶片通过高速叶片的宽度沉降后形成,如图1所示。在高低速工况下,通过轴向调节的方式,喷嘴环上的高低速叶片处于流道工作位置不同,从而改变涡轮流通特性,如图2所示。

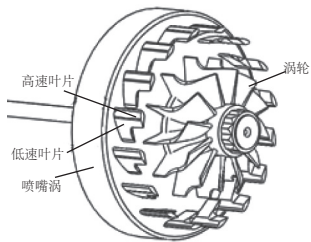


图1 喷嘴叶片结构示意图

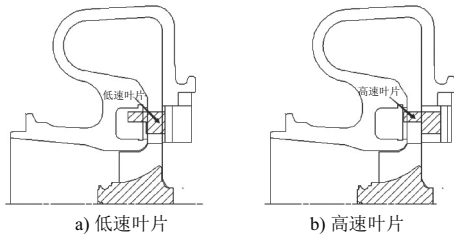


图2 高低速叶片工作示意图

1.2 理论计算

气体流经涡轮时,涡轮的膨胀比 π_r^* 为:

$$\pi_r^* = P_{r1}^* / P_{r2}^* \quad (1)$$

式中: P_{r1}^* 为涡轮进口绝对静压; P_{r2}^* 为涡轮出口静压。

涡轮轴输出功率为:

$$H_T = \frac{k}{k-1} R (T_c^* - T_r^*) \frac{G_c}{G_r} \quad (2)$$

式中: k 为气体绝热指数,当涡轮工质为燃气时, $k=1.34$; R 为空气气体常数,当涡轮工质为燃气时, $R=287.4$; G_c 为压气机进气流量; G_r 为涡轮进气流量; T_c^* 为涡轮进口气体总温; T_r^* 为涡轮气体出口总温。

涡轮绝热膨胀功率为:

$$H_{Tad} = \frac{k}{k-1} R T_r^* \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_r^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (3)$$

因此,涡轮效率为:

$$\eta = \frac{H_T}{H_{Tad}} \quad (4)$$

气体通过不同结构高低速叶片时,气体的气流角发生变化,进入涡轮的攻角也随之改变。对于本文采用的径流式涡轮,气体在涡轮内部的绝对速度是相对速度与牵连速度的矢量和。

$$c = u + \omega \quad (5)$$

式中: u 为牵连速度,表示叶轮工作方向;切线速度 ω 为相对速度,表示以旋转的叶轮为参照物的速度。其气流在涡轮中速度三角形如图3所示。

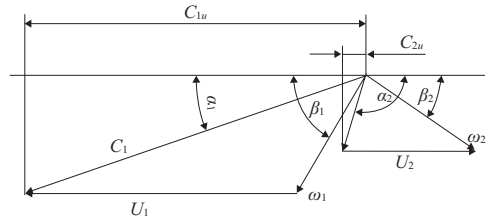


图3 涡轮速度三角形

图3中: α_1 和 α_2 分别为涡轮入口和出口气流角; β_1 和 β_2 分别为叶型安装入口角和出口角; C_{1u} 和 C_{2u} 分别为气流入口角和出口速度圆周方向的分量。

2 实验与仿真分析

涡轮性能试验在涡轮增压器试验台进行,依据测试试验标准,通过风机调节涡轮端的进气体流量,燃烧室模拟发动机燃烧得到高温气体,调节可变截面涡轮增压器喷嘴叶片开度,保证高速叶片和低速叶片处于对应高低速工况下,测量并计算出涡轮增压器的进排气各相关物理性能参数。保证涡轮在一定转速的情况下,通过不断改变涡轮端进气量和压气机排气背压的方式,获取变工况下涡轮增压物理特性。

可变涡轮增压器的流体介质主要为高温高压的气体,气流进出口压力较大,温度较高,为高速可压缩气体。考虑到气体分子的粘滞力影响,仿真模型采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和 SIMPLE 算法,忽略重力对流场的影响。本文针对典型喷嘴叶片高低速工况下,高低速叶片对气体流通特性和涡轮的性能研究分析,通过对某轴向调节式 VGT 涡轮端的三维动态流场特性的仿真分析,从气体压力、流速流线等方面分析高低速叶片对涡轮流通特性的影响。

3 计算结果及分析

3.1 高低速工况下涡轮性能分析

本文依据仿真计算的数据,计算并绘制高低速叶片下涡轮的气体流量-涡轮效率特性以及气体流量-膨胀比特性曲线,如图4所示。由图4可以得出,低速工况下的涡轮的效率高于高速工况,其膨胀比也较高速工况更大。高低速工况下,随着气体流量的增大,涡轮效率略有提高,膨胀比也略有提高。实验数据与可变涡轮增压器对高速叶片要求是符合的,即低速低流量工况下,低速叶片能够有效提高涡轮加速性能和增加进气量;在高速高流量工况下,高速叶片可防止涡轮超速。

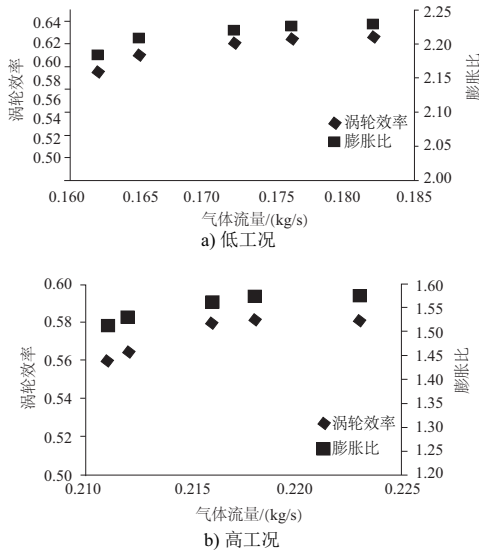


图4 涡轮特性对比

3.2 高低叶片喷嘴区域情况分析

1) 高低工况下不同叶片表面静压分布分析

不同喷嘴叶片工作时的喷嘴环区域分布:总体上看,喷嘴环叶片的静压均沿着气体流动方向降低,高速工况叶片受到的静压载荷大于低速叶片。当涡轮处于低速工况时,如图5a)所示,低速叶片的背面静压变化比迎风面明显,低速叶片进出口静压降低达70.1%,气体压力降低明显;当高速工况时,如图5b)所示,高速叶片表面静压降低相对不明显,高速叶片在流场中起主导作用,喷嘴区域静压降低达49.7%,气体在喷嘴区域压力降低较平缓。

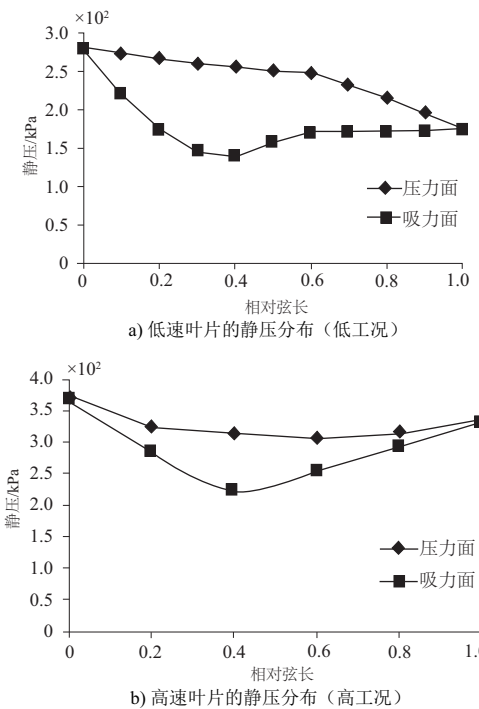


图5 喷嘴叶片在高低工况下的静压分布

2) 高低速叶片槽流道的气体加速情况分析

图6给出气流经过高低速叶片槽道时,气流速度矢量

的变化情况,图6a)气流经过高低速叶片槽道内,均出现加速的膨胀,气流的速度值增大明显,气流到达喉口处,气流在喷嘴叶片中从入口角 6° 增加到气流出口角 32° ,合适的气流攻角有利于气体对涡轮做功^[9]。图6b)气流经过高工况叶片,叶片在尾缘处混合明显,这必然会造成能量的损失,这中间流道气流进口角为 10° 增加到气流出口角为 41° ,较大的气流攻角降低了对叶片的冲击力。

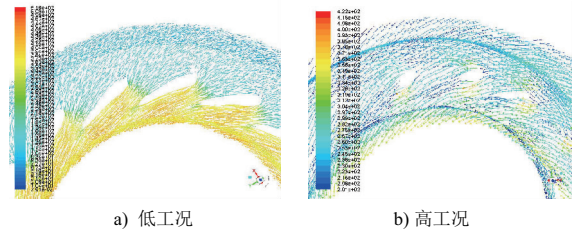


图6 不同工况下喷嘴区域速度分布情况

喷嘴叶高50%处所对应的中间槽道位置的马赫数分布如图7所示。从图7中可以得出,高速工况气流速度明显高于低速工况,且均在喷嘴叶片喉口位置达到速度最大值。但在不同工况的气流速度变化趋势不同:低速工况下,气流经过叶片时,气体速度明显增加,到达出口喉口处,速度接近声速;而高速工况过程中,由于气流量较大,在0~40%相对弦长的位置,气流挤压明显,紊流引起气流速度降低,之后随着表面流道变化,膨胀损失降低,其速度较快上升,在叶片尾缘位置的速度已超过声速。

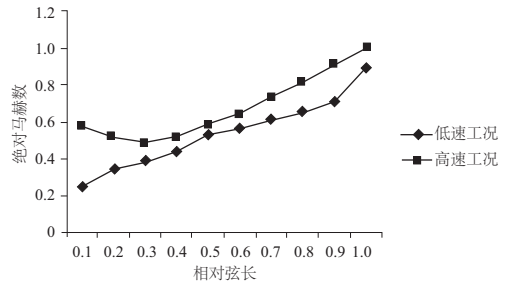


图7 不同工况中间槽速度分布

3) 高低工况喷嘴叶片对涡轮的激波现象分析

气体从喷嘴进入涡轮的转静过渡流域类似“先缩后扩”的过程,在一定的边界条件下容易引发激波。从图8中静压等值线分布可以发现,高低速叶片在叶前缘处静压线密集,其中低速叶片的静压等势线比高速叶片更密集。这表明,低速叶片产生的激波比高速叶片更强,这有利于提高气流出口速度。随着气流在喷嘴流道内加速,膨胀做功,激波强度明显减落。激波方向沿周向方向传播,喉部位置激波消失,有利于减缓激波对涡轮叶片的周期性冲击,防止涡轮转子周期疲劳断裂。

3.3 喷嘴叶片对涡轮流场的影响

1) 不同工况下涡轮进口气动性能分析

涡轮进口区域处于涡轮端转静交接区域,气体进入高速旋转流场区域,如图9所示。低速叶片在涡轮流道内形成较大涡流,这是由于喷嘴叶片在低速叶片下,其速度和攻角发生变化,在涡轮流道内产生反向的旋转涡流,如图

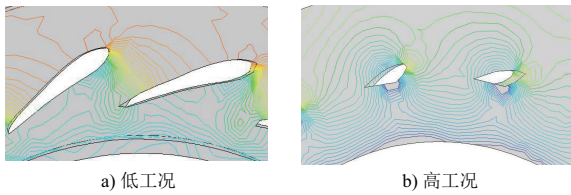
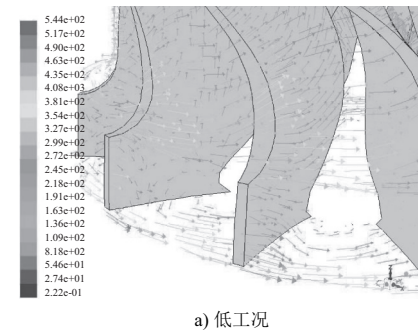
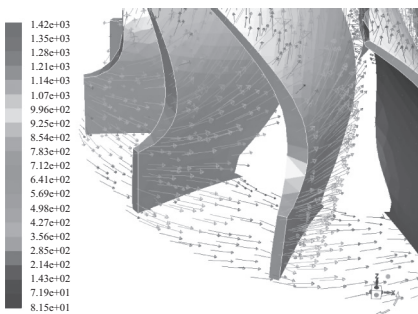


图8 喷嘴叶片在高低工况下的静压分布

9a)所示,有效地抑制涡轮叶片吸力面侧的气流与叶片分离,减少气流分离损失,有助于提高涡轮效率。而高速叶片由于速度较快,未形成涡流,直接冲击叶片,快速地通过涡轮流动,如图9b)所示。



a) 低工况

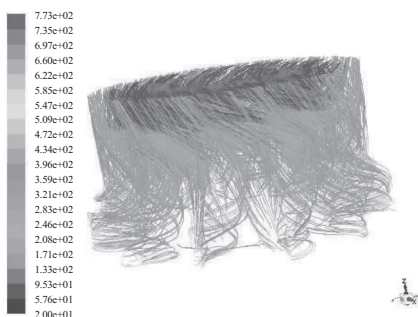


b) 高工况

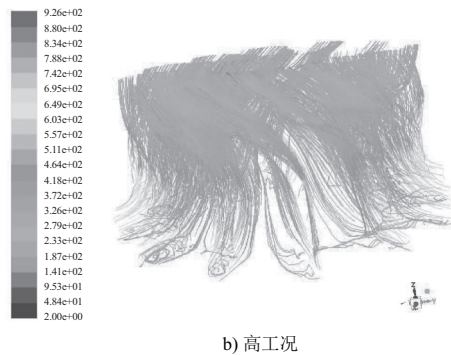
图9 涡轮场气体速度矢量分布

2) 不同工况下涡轮流场分析

气体在涡轮叶片表面气流运行状况,如图10所示。在低速工况下,如图10a)所示,气体旋涡进入涡轮流道,气体贴近叶片吸力面,涡轮流道流通特性良好,气体流速变化较大,与涡轮的动能转换较大,有利于涡轮效率提高;在高速工况下,如图10b)所示,大流量气体能够快速通过涡轮流道,流速降低幅度小,且入口气流涡轮与蜗壳间隙出现较多流线,表明有明显泄漏现象,阻止涡轮功率进一步提高,防止涡轮超速。



a) 低工况



b) 高工况

图10 涡轮场气体流线分布

4 结语

1) 完整气动叶型的低速工况叶片工作时,膨胀比大,增压器效率高,提高了涡轮的响应时间和加速性能;不完整气动叶型的高速叶片,膨胀比小,涡轮效率较低,可防止涡轮超速现象产生。

2) 喷嘴高低速叶片对气流引导作用不同:低速叶片能够较好地引导气流,动能转换明显,速度和气流进出口角变化大,有明显的激波现象;经过高低速叶片喷嘴区域,高速叶片表面压力和气体速度变化平缓。

3) 由气体进入涡轮流动情况可知,涡轮的进口区域涡流现象明显,仿真气体与叶片间的分离、流道路径较长,能量转换效率高;气体流经高速叶片,涡轮流道具有良好的流通性,涡轮与蜗壳间隙泄漏现象明显,影响涡轮输出效率。

参考文献:

- [1] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京:机械工业出版社,1992: 345-348.
- [2] 郭鹏江,王天灵,吴君华,等. 可变喷嘴涡轮增压器喷嘴环叶片位置对柴油机性能的影响[J]. 内燃机工程,2010, 31(2): 41-47.
- [3] 王建昕,帅石金. 汽车发动机原理[M]. 北京:清华大学出版社,2011: 109-119.
- [4] M.Capobianco, A.Gambarotta.Variable geometry and wastegated automotive turbochargers: measurements and comparison of turbine performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012,144:553-560.
- [5] HIDEAKI T, MASARU U. Study on flow fields in variable area nozzles for radial turbines[J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2008,1(1):47-56.
- [6] STEVEN W.BURD, TERRENCE W. Simon. Flow measurements in a nozzle guide vane passage with a low aspect ratio and endwall contouring[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(10): 659-666.
- [7] 陈钢,刘毅,朱爱国,等. VGT 涡轮增压器涡轮级性能仿真预测研究[J]. 车用发动机, 2017(6):79-83.
- [8] 王航,刘莹,朱智富,等. 周向进气角对部分进气涡轮性能影响的数值模拟[J]. 车用发动机, 2012(4):70-74.
- [9] YEO J H, BAINES N C. Pulsation flow behavior in a twin-entry vaneless radial inflow turbine[J]. Pro. Inst. Mech. Engrs, 1996(6):113-122.

收稿日期:2018-08-23