

基于 CFD 的车用气波增压器三维仿真

雷 艳, 周大森, 张红光

(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘 要: 为了研究气波增压器内部气体流动, 建立了气波增压器三维非定常流动模型, 基于 FLUENT 软件进行了气波增压器气体流动的 CFD(computational fluid dynamics) 计算. 搭建了气波增压器性能测试系统, 进行了气波增压器性能试验研究并测量了 CFD 计算所需的边界参数. 气波增压器三维非定常流动模型计算结果与试验结果一致. 结果表明气波增压器运行在高转速范围时性能良好.

关键词: 气波增压器; 计算流体力学; 三维模型

中图分类号: TK 421. 8

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2010) 07 - 0990 - 05

气波增压技术(pressure wave supercharger, PWS) 利用发动机的排气能量来提高发动机进气压力; 它利用气波(压缩波和膨胀波) 来传递能量^[1-2], 具有低速大扭矩、瞬态响应快^[3]、加速时不冒黑烟的优点, 特别适用于需经常在变负荷工况下工作的车用发动机^[4]. 目前, 针对气波增压器的研究主要是仿真计算. 早期的气波增压器流动模拟计算由于受到计算机技术的限制, 运用特征线法来求解转子内部的流动^[5], 大多数气波增压器的流动模拟计算基于一维气体动力学模型. 近年来不断出现二维、三维的流动模型计算, 这些三维流动模型大多数针对运用于燃气轮机的气波转子^[6-11].

本文在气波增压器性能测试台架上进行了不同工况下的气波增压器性能试验研究. 同时, 本文基于计算流体力学 CFD(computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟计算方法, 运用 Fluent 软件对气波增压器气体流动进行了三维仿真计算, 揭示气波增压器气体流动特点.

1 气波增压器性能测试系统

气波增压器性能测试系统如图 1 所示. 试验用气波增压器是瑞士 ABB 公司生产的 COMPREX 气波增

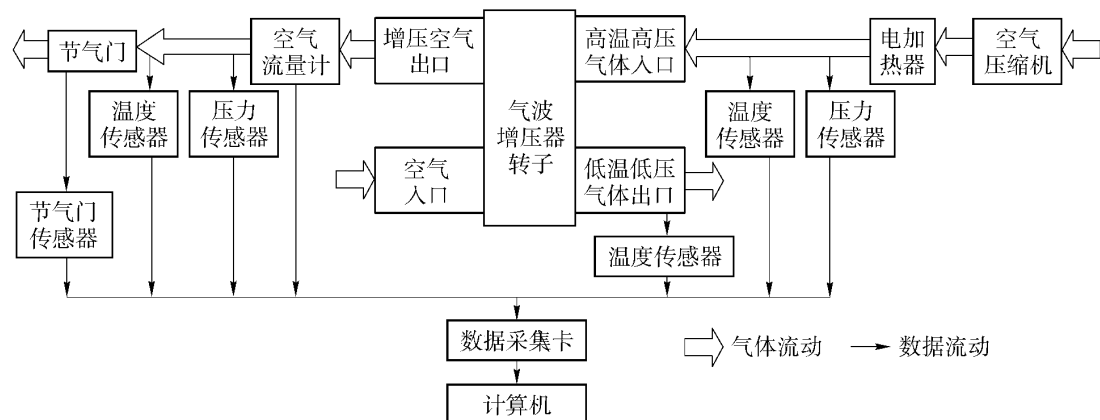


图 1 气波增压器性能测试系统示意图

Fig. 1 Schematic of PWS performance test system

收稿日期: 2008-09-08.

基金项目: 北京工业大学博士启动基金项目资助(X0005015200901); 教育部留学回国人员科研启动基金项目资助(32310790200801) .

作者简介: 雷 艳(1975—), 女, 湖南永州人, 讲师.

压器,通过变频电机调整气波增压器的转速.气波增压器性能测试系统能模拟气波增压器的工作状况,由于来自发动机气缸内的高压高温的排气与来自大气中的低压低温的空气在气波增压器中直接接触,为了模拟发动机排气,采用一台压缩机给空气加压,并用电加热器对空气加热.进行了不同电机转速、不同加热温度、不同压力工况下的试验,测量了各个气体出入口的压力、温度、流量.

2 气波增压器气体流动 CFD 计算

气波增压器工作时,来自发动机的排气与新鲜空气在转子槽道中直接接触,能量通过气波(压缩波和膨胀波)从排气传递到进气.

2.1 气波增压器三维非定常流动模型的建立

2.1.1 三维几何模型和计算网格生成

为了进行 CFD 计算,首先要对气波增压器内部气体进行三维建模.运用三维设计软件 CATIA 完成对气波增压器内气体的三维建模,如图 2(a)所示,几何模型的网格划分如图 2(b)所示.

2.1.2 三维非定常流动控制方程

气波增压器气体流动可用气体动力学、热力学相关方程来描述.在 PWS 三维非定常流动模型数值模拟计算中,湍流模型选用了标准 $k-\epsilon$ 模型,其基本控制方程如质量守恒方程、Navier-Stokes 方程(动量守恒)、能量守恒方程可用 Euler 等式总括为向量形式

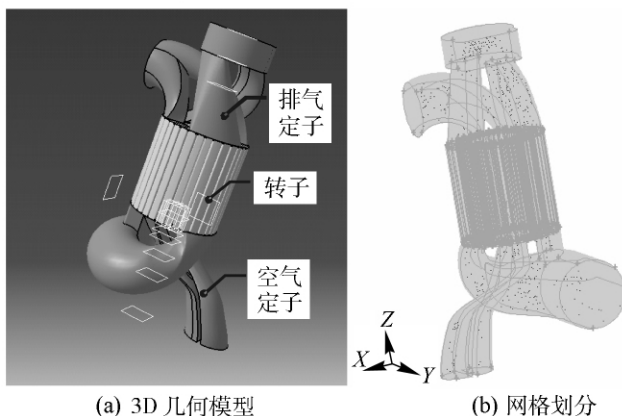


图 2 PWS 内部气体 3D 几何模型及网格划分

Fig.2 3D Model and its meshes of fluid inside PWS

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial(\mathbf{F} - \mathbf{F}_v)}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{G} - \mathbf{G}_v)}{\partial y} + \frac{\partial(\mathbf{H} - \mathbf{H}_v)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\text{其中 } \mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ -p + \rho h_0 \end{pmatrix}; \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho u h_0 \end{pmatrix}; \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ p + \rho v^2 \\ \rho vw \\ \rho v h_0 \end{pmatrix}; \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho wv \\ p + \rho w^2 \\ \rho wh_0 \end{pmatrix}; \mathbf{F}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} + k \frac{\partial T}{\partial x} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{G}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} + k \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix}; \mathbf{H}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} + k \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix}$$

式中 ρ 为密度; u, v, w 为速度分量; e 为内能; p 为压力; T 为温度; h 为焓; τ 为黏性力.

2.1.3 三维非定常流动模型的边界条件

在气波增压器三维非定常流动模型中定义了 5 个流体区域: 转子流体区域、高温高压排气流体区域、低温低压排气流体区域、新鲜空气流体区域、增压空气流体区域,这样分开定义各个定子和转子内的流体可以方便地设定各个不同流体区域的运动状态,实现转子流体与各个定子流体间的相对运动,并且定义各

个流体区域的进口边界、出口边界为压力进口、压力出口,这样可以获得较好的收敛速度.气波增压器工作时,转子高速旋转.因此,在气波增压器三维非定常流动模型的边界条件设定过程中,将转子中的流体定义为运动网格,这样定义的转子流体可以不同的转速围绕旋转轴 z 轴旋转.

2.1.4 三维非定常流动模型求解

由于气波增压器转子中气体高速运转,是高速可压缩流体,因此,在模型求解时采用耦合隐式求解方法,设定了 $k-\epsilon$ 标准两方程的湍流模型.为了获得更高的计算精度,仿真计算采用了二阶迎风精度.气波增压器开始工作时,各个定子、转子槽道中首先是充满了大气,因此,在进行初始化流场时,以环境大气作为流场变量初始化整个流场.在进行气波增压器流动模拟计算时,分别进行了不同转子转速工况下的模拟计算.各个转速工况下的边界条件的数值由试验测量得到.在进行非定常流动的迭代求解时,以转子旋转一周所需时间为总的迭代时间.

3.2 计算结果及分析

进行了不同转速工况(3.8、7.6、10.15和15.2 $\text{kr} \cdot \text{min}^{-1}$)的气波增压器三维非定常流动模拟计算.

图3显示了PWS四个通道口边界面处的气体速度.随着PWS转速 n 的升高,各个通道口气体速度均呈增加趋势.特别是在PWS转速 $n = 15.2 \text{ kr} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,空气入口处气体速度增幅最大,其速度迅速上升,这得益于气波增压器中螺旋形的新鲜进气通道结构设计,空气在流入空气定子的通道时得以加速,提高动量.

高的新鲜空气的流速有利于新鲜空气顺利流入转子槽道,增大进气流量,提高对槽道内残余的低压气体的扫气效率.

从图4显示各个PWS转速工况下的速度流场的结果可见,定子的速度相对于转子而言,基本上保持不变,转子槽道内的气体流速大大高于定子内流体的速度.

在狭窄的转子槽道有2种不同压力的气体相遇产生气波,在气波的作用下槽道内气体加速流动.

由各个PWS转速工况下的压力流场可见,相对于高速旋转的转子槽道内流体而言,气波增压器空气定子、排气定子内流体的压力更为稳定,各个定子流体区域内压力值基本保持不变,而转子内的流体,根据分布在不同定子开口区的位置的不同而使得不同槽道内的气体压力值不同,但就单个转子槽道而言,在整个槽道内气体压力均匀相等.

从温度流场图来看,排气定子的高温排气端流体温差较大,而在空气定子内的温度分布均匀.转子内的也存在温差,但不明显.

从湍流强度的计算结果来看,相对于静止的定子,转子槽道内的流场的湍流强度明显较高,整个转子槽道中的涡流强度相对较均匀,这是由于转子高速旋转,气波在狭窄的转子槽道中高速传播,整个转子槽道流动变化较小.

随着PWS转速的升高,湍流强度增加.

不同的PWS转速工况下,压力、温度、速度、湍流强度的变化趋势是一致的,差别在于数值的大小不同,高转速区域相对应的各个流场参数的数值越大,PWS转速越低,气波增压器内部流场的各个参数数值越小,性能差.这说明,对于气波增压器而言,应尽可能地运行在高速范围,避免运行在低速范围.

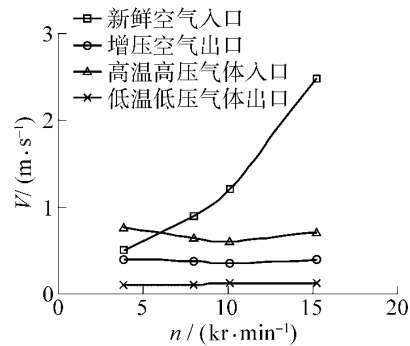


图3 PWS各通道口边界面处的气体速度

Fig. 3 Velocities at different ports



图 4 PWS 三维非定常流动仿真结果

Fig. 4 Simulation results of 3D unsteady flowing of PWS

同时,将试验结果与气波增压器三维非定常流动模型计算结果进行比较,以验证模型计算的准确性.在台架试验中测量了增压空气出口端的空气流量,空气流量的试验测量值与 CFD 计算值的对比见图 5.由图可见,整个 PWS 转速范围内,CFD 的计算结果基本上与试验结果相吻合,增压空气流量的计算值曲线与试验值曲线变化趋势一致,随着 PWS 转速的上升,增压空气流量相应增大.在气波增压器中、高速区域,计算值、试验值一致性好,误差较小,均小于 5%.

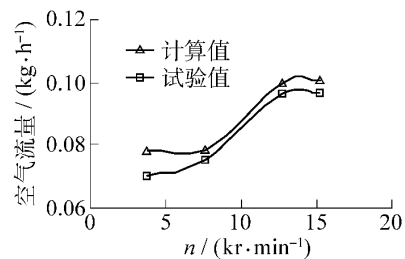


图 5 CFD 计算结果与试验结果对比

Fig. 5 CFD results compared with experimental data

但在低速区域,误差稍大.可见,气波增压器三维非定常流动模型更适用于高转速范围.

4 结论

针对整个气波增压器结构(包括转子、定子)建立了气波增压器三维非定常流动模型,进行了不同PWS转速工况的数值模拟计算,并将CFD计算结果与试验结果进行比较,模型误差较小,尤其是在中、高PWS转速范围内计算值与试验值一致,能较好的描述中、高PWS转速的流动状况.CFD计算结果表明提高加热温度和气波增压器转速有利于提高气波增压器性能.

参考文献:

- [1] GYARMATHY G. How does the complex pressure-wave supercharger work [C] // SAE, SAE 830234, Warrendale: SAE International, 1983: 91-105.
- [2] 吴文,黄晓. 气波增压器的研究[J]. 内燃机学报, 1995, 13(2): 163-172.
WU Wen, HUANG Xiao. The researches of pressure wave supercharger[J]. Transactions of CSICE, 1995, 13(2): 163-172. (in Chinese)
- [3] ICINGUR Y, HASIMOGLU C. Effect of complex supercharging on diesel emissions[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 1745-1753.
- [4] ZEHNDER G, MAYER A. The free running complex [C] // SAE, SAE 890452, Warrendale: SAE International, 1989: 784-796.
- [5] SELERWICZ W, PIECHNA J. Complex type supercharger as a pressure-wave transformer flow characteristics [J]. The Archive of Mechanical Engineering, 1999, XLVI(1): 57-77.
- [6] AKBARI P, NALIM R, MUELLER N. A review of wave rotor technology and its applications [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128: 717-735.
- [7] WEBER F, GUZZELLA L. Control oriented modeling of a pressure-wave supercharger (PWS) to gasoline engine [C] // SAE, SAE2000-01-0567, Warrendale: SAE International, 2000: 665-674.
- [8] WEBER F. Mean value modeling of a pressure-wave supercharger including exhaust gas recirculation effects [D]. Zurich Switzerland: Institute of Dynamic System and Control, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2001.
- [9] SPRING P. Modeling and control of pressure-wave supercharged engine systems [D]. Zurich Switzerland: Institute of Dynamic System and Control, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2006.
- [10] SCHRUF G M, KOLLBRUNNER T A. Application and matching of the Complex pressure-wave supercharger to automotive diesel engines [C] // SAE, SAE paper 840133, Warrendale: SAE International, 1984: 75-88.
- [11] FATSIS A, ORFANOUDAKIS N G, PAVLOU D G, et al. Unsteady flow modelling of a pressure wave supercharger [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D (Journal of Automobile Engineering), 2006, 220: 209-218.

CFD Simulation of Pressure-wave Supercharger for Passenger Cars

LEI Yan, ZHOU Da-sen, ZHANG Hong-guang

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: This research aims at investigating the flow in PWS. A 3D unsteady flow model of the PWS was completed based on the way of CFD. In order to gain the boundaries, parameters were tested by PWS test system. The PWS 3D unsteady flow model is available to simulate the flow both within the rotor and casings at different rotational speeds with good agreement with experimental results. The results give the clue that the optimum high rotor rotation speed can help the PWS gain satisfied performance.

Key words: pressure-wave supercharger; computational fluid dynamics; 3D model

(责任编辑 张士瑛)