

文章编号: 1000-8055(2010)06-1322-05

双对置二冲程柴油机扫气过程仿真研究

陈文婷¹, 诸葛伟林¹, 张扬军¹, 于红胜²

(1. 清华大学 机械工程学院 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国兵器工业集团公司 中国北方发动机研究所, 廊坊 086000)

摘 要: 基于双对置二冲程柴油机直流扫气过程流动特点, 建立了该发动机扫气过程瞬态流动三维计算流体动力学(CFD)仿真模型, 应用 AVL FIRE 软件对该发动机额定工况(功率 160 kW, 转速 2500 r/min)下的扫气过程进行了仿真研究, 结果显示该工况下发动机扫气效率可达 94%。通过扫气过程不同时刻流场分析发现, 采用直流扫气方式可较好避免新鲜充量与废气的相互掺混, 有效提高高速二冲程发动机扫气质量。

关 键 词: 双对置; 二冲程; 直流扫气; 流动仿真; 扫气效率

中图分类号: V234; TK411.8

文献标识码: A

Simulation on the scavenging process of the opposite two-stroke diesel engine

CHEN Wen-ting¹, ZHUGE Wei-lin¹, ZHANG Yang-jun¹, YU Hong-sheng²

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy,

School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China North Engine Research Institute,

China North Industries Group Corporation, Langfang 086000, China)

Abstract: According to the flow characteristics of the opposite two-stroke diesel engine, the suitable flow control equations and turbulence model were chosen to model the high swirl and turbulent flow. The unsteady computational fluid dynamics (CFD) simulation models were developed to simulate the scavenging process under the rated condition. The scavenging efficiency was calculated and the detailed flow fields were analyzed. Results show that a 94% scavenging efficiency can be achieved with the turbocharging uniflow scavenging method.

Key words: opposite; two-stroke; uniflow scavenging; flow simulation; scavenging efficiency

无人机作为在未来发展中不可或缺的航空器, 对发动机提出了大功率、轻质量、小体积的要求。目前现有无人机动力中功率密度最高为 1.5 kW/kg, 因此, 迫切需要在大幅度提高功率密度方面取得技术突破^[1-5]。活塞式内燃机作为无人机动力具有良好的发展前景。理论上, 活塞式发动机采用二冲程相对于四冲程升功率可以提高一倍, 双对置二冲程柴油机在传统二冲程发动机的基础

上采用“对置活塞、对置气缸”的新结构^[6], 见图 1, 其功率密度可达到 2 kW/kg, 同时能够实现动力单元模块化组合, 是一款非常适用于无人机的动力装置。

扫气过程的优劣直接影响到发动机的动力性、经济性以及排放性能。与四冲程发动机相比, 传统高速二冲程发动机由于扫气时间短、进排气过程同时进行, 存在新鲜气体与废气掺混严重, 缸

收稿日期: 2009-05-11; 修订日期: 2009-11-12

作者简介: 陈文婷(1985-), 女, 江西九江人, 硕士生, 主要研究方向为发动机热流体分析。

E-mail: chenwt09@mails.tsinghua.edu.cn

内残余废气系数大,扫气质量差等问题^[7].因此,针对传统高速二冲程发动机的扫气缺陷,双对置二冲程柴油机采用可控直流扫气的换气方式,其进、排气口分布在气缸两端,气口的开闭由对置的活塞控制,从而实现沿气缸轴线的直流扫气过程.在该结构中,进排气口有充足的流通面积,进气口沿切向方向排列,使得进入气缸的新鲜充量一边绕气缸轴线旋转,同时沿气缸轴线向前推进,可较好避免新鲜充量与废气的相互掺混.另外,由于采用错拐曲轴设计实现了非对称配气相位,可进行过后充气,能有效改善传统二冲程发动机的扫气问题.

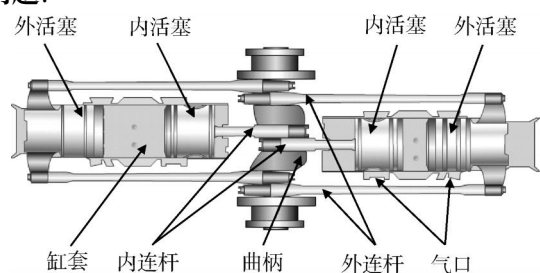


图1 双对置二冲程柴油机结构示意图

Fig.1 Structure of the opposed diesel engine module

本文基于双对置二冲程柴油机直流扫气过程流动特点,应用李斯特内燃机及测试设备公司(AVL)的AVL FIRE软件建立了该发动机扫气过程瞬态流动三维计算流体动力学(CFD)仿真模型,并对模型进行了验证.针对发动机额定工况(功率160 kW,转速2500 r/min)下的扫气过程进行了瞬态仿真计算,并对扫气过程不同时刻缸内流场进行了分析.

1 扫气系统结构

进排气道设计对双对置二冲程柴油机扫气过程有重要影响,图2为发动机进气道结构图.进气道末端与缸壁过渡处设计为大圆角结构,使进气管内侧的流通截面得到充分利用.气缸壁上开有两排进气口,由一直流排和一涡流排组成,这样既降低了对气流的阻挡作用,提高了进气流通系数,又在缸内形成绕气缸轴线的进气涡流,以促进燃油的雾化和燃烧.

图3为发动机排气道结构图,排气口由单一直流排组成.排气道末端与缸壁过渡处亦设计为大圆角结构,以充分利用排气流通面积.

进、排气口分布在气缸两端,气口的开闭由对置的内、外活塞控制.新鲜充量从进气道进入,在进气涡流排和直流排的作用下绕气缸轴线旋转,

同时沿气缸轴线向前推进,将废气逐渐推出气缸,从而实现直流扫气过程.

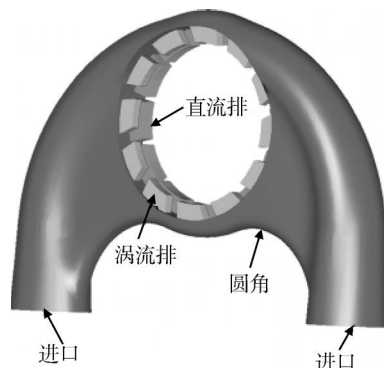


图2 进气道结构图

Fig.2 Structure of the intake manifold

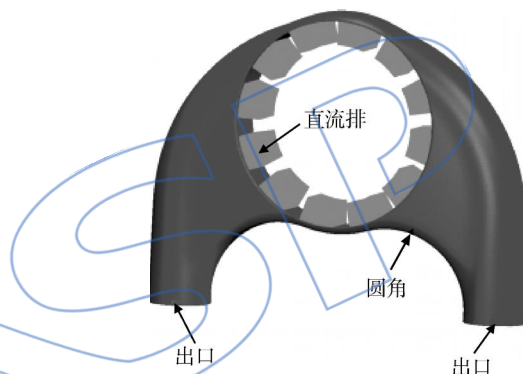


图3 排气道结构图

Fig.3 Structure of the exhaust manifold

2 三维流动模型

双对置二冲程柴油机扫气过程中气体是复杂的三维黏性流动,其内部存在旋涡、分离等复杂的流动现象^[8].随着运行工况的变化,其内部流动状况变化明显.利用三维瞬态仿真,可以研究发动机扫气过程流动机理,并通过缸内气体组分变化计算得出发动机扫气效率,从而评价其扫气过程的好坏,为发动机进排气系统设计提供依据.

2.1 流动控制方程

根据发动机内部气体流动遵循的物理学三大守恒定律分别建立三维可压缩流动的质量守恒方程,动量守恒方程和能量守恒方程^[9].

2.2 流动湍流模型

在发动机气体湍流计算中,使用最广泛的是两方程或多方程模型,本文计算选取 $k-\zeta_f$ 模型. $k-\zeta_f$ 湍流模型为四方程模型,由于引入了新的输运方程来表征与湍动黏度 μ 有关的变量 ζ ,因而能体现湍流各向异性的特点^[10-12],对旋流和分离

流动的模拟精度较高,同时其计算量较广泛使用的 $k-\varepsilon$ 模型没有明显增加.

2.3 网格划分及边界条件

本文将发动机换气系统分成进气道、排气道、气缸三个部分进行模块化建模和网格划分. 气道的气口以及气缸与气道的交接处附近流动较复杂,网格尺寸为 1 mm,其余部分网格尺寸为 2 mm,见图 4 和图 5.

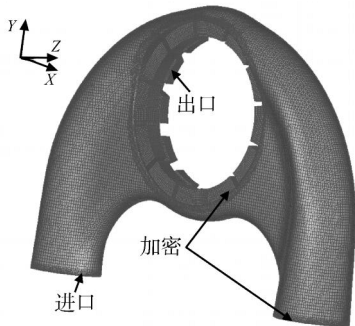


图 4 进气道网格划分
Fig. 4 Volume mesh of the intake manifold

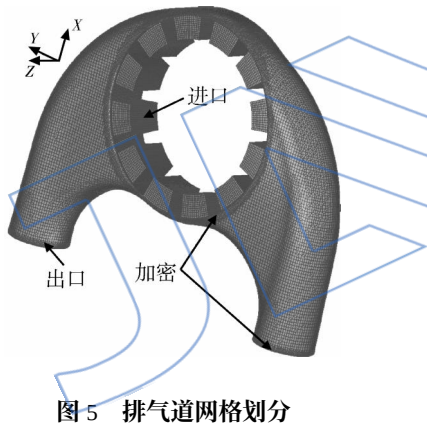


图 5 排气道网格划分
Fig. 5 Volume mesh of the exhaust manifold

扫气过程计算涉及到的边界条件主要有进口/出口边界,壁面边界和移动边界. 进出口边界按照一维计算结果给定压力参数,壁面边界给定相应的温度分布,移动边界按照动网格生成给定移动壁面边界.

2.4 模型验证

采用 AVL 气道稳流试验台对计算模型进行了验证,见图 6. 选取气道压差 3 kPa,在特定进气口开度下进行稳流试验,同时设置与试验条件相同的边界条件进行仿真计算. 试验与计算所得进气道空气质量流量对比见图 7,可以看出,计算值与试验值吻合良好,该模型满足模拟精度的要求.

进气质量流量随进气口开度增大而不断增大. 由于涡流排与直流排之间的非流通截面,当进气口

开度增大到 6.5~9.5 mm 段时,曲线较平缓.

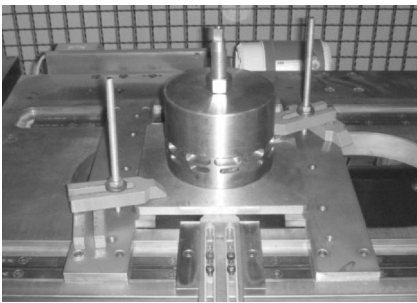


图 6 AVL 气道稳流试验台
Fig. 6 AVL steady flow test rig

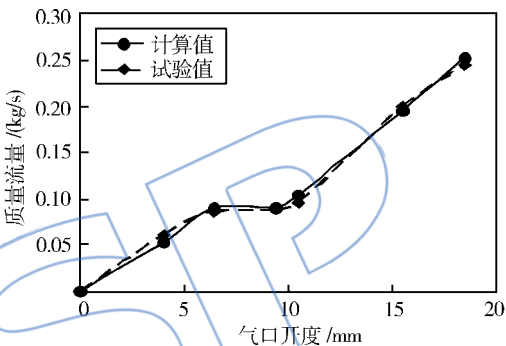


图 7 进气道计算与试验流量对比
Fig. 7 Comparison between experiment results and simulation results

3 均值边界扫气过程瞬态流场分析

双对置二冲程柴油机扫气过程分为从排气口开启到进气口开启的自由排气阶段,进气口开启到排气口关闭的扫气阶段和排气口关闭后的充气阶段. 根据不同换气阶段建立其扫气过程三维瞬态流动 CFD 仿真模型见图 8. 利用该仿真模型对双对置二冲程柴油机额定工况 (功率 160 kW, 转速 2 500 r/min) 下的扫气过程进行仿真计算.

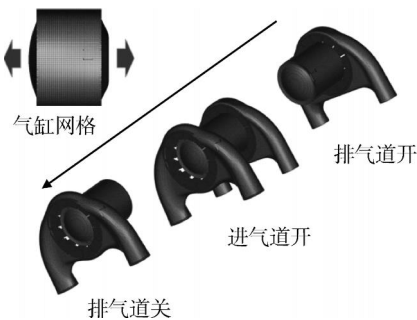


图 8 动网格几何模型
Fig. 8 Process of the moving mesh

3.1 初、边值条件

双对置二冲程柴油机进气系统采用废气涡轮

增压,参考 BOOST 一维计算结果,根据增压器能量守恒原理设置均值边界条件如下:

进口 总压 0.25 MPa,温度 323 K;

出口 静压 0.21 MPa.

以排气口开启时刻作为计算始点,初始条件设置如下:

进气道 压力 0.25 MPa,温度 323 K;

排气道 压力 0.21 MPa,温度 580 K;

缸内 压力 0.45 MPa,温度 900 K.

3.2 扫气效率分析

图 9 显示了该二冲程发动机换气过程扫气效率变化曲线.计算得到该工况下双对置二冲程柴油机扫气效率可达 94 %.

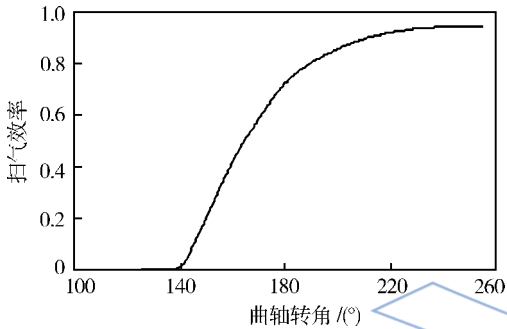


图 9 扫气效率曲线

Fig. 9 Curve of scavenging efficiency

图 10 显示了双对置二冲程柴油机的扫气过程.其中图中白色代表新鲜气体,黑色代表废气.

在额定工况下,进气口刚打开时,由于气缸压力略高于进气口压力,从气缸到进气口出现轻微的逆流.随着曲轴转角增加,气缸压力下降充足,越来越多的新鲜气体开始从进气道进入气缸,同时将废气逐渐扫除;在曲轴转角 $\alpha_c = 170^\circ$ 时,已有接近 50 %新鲜气体进入气缸.新鲜充量在气缸内旋转形成一个“空气活塞”,将废气推出气缸,较好的避免了与废气的互相掺混.由于进气道的对称结构,新鲜充量也呈接近对称的形式进入气缸;在 $\alpha_c = 220^\circ$ 时,大部分废气已被扫出气缸,同时部分新鲜气体进入排气道;在排气道关闭时,缸内已基本无废气残留.

3.3 瞬态流场分析

由于活塞的周期性运动,气道和气缸内气体流动状态变化剧烈.图 11 显示了扫气过程中气缸横截面上的速度矢量分布.在进气道开启初期,由于扫气压差较小,缸内流速较小;到 $\alpha_c = 190^\circ$ 时,随着扫气压差的增大以及扫气口流通面积的增加,扫气作用变得强烈,新鲜充量大量进入气缸,

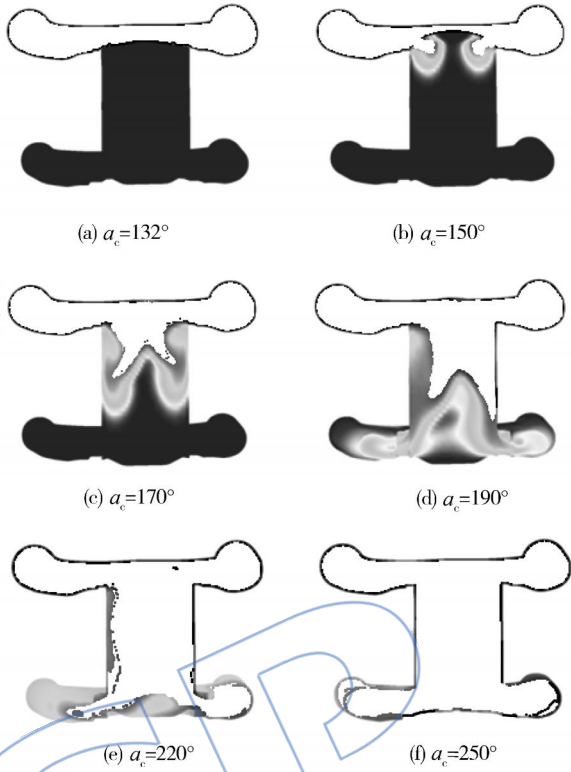


图 10 缸内扫气过程

Fig. 10 Scavenging process in cylinder

缸内流速较高,同时由于涡流排进气口的作用,在缸内形成进气涡流;在排气道关闭后 ($\alpha_c = 250^\circ$),主要为过充气阶段,此时缸内气体流速开始下降,同时由于进气道直流排和涡流排进气口的相互作用,气缸内形成多个分散的小涡流区域.随着活塞继续上行,缸内气体受到压缩而压力提高,继而进入压缩阶段.

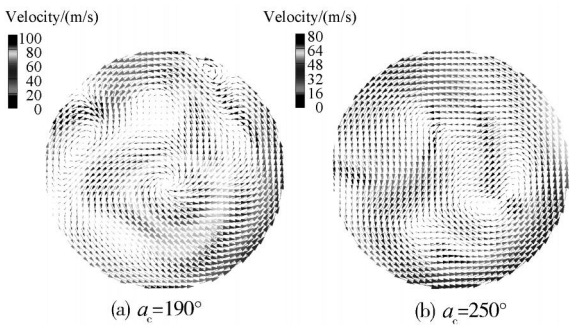


图 11 气缸横截面速度分布

Fig. 11 Velocity distribution on the cross-section of the cylinder

图 12 显示了扫气过程中气缸轴截面速度矢量分布.可以看出,在进气道开启初期,进气口存在轻微逆流,此时缸内流动较均匀;随着曲轴转角的增加,缸内压力逐渐降低,进气口开度不断增

加,新鲜充量以较高的流速进入气缸;在进气道开启一段时间后($\alpha_c = 190^\circ$),由于进气气流扫气作用,大量新鲜气体进入气缸,缸内流场开始变得复杂,在进气道至排气道的流通过程附近,开始形成大小不一的旋涡流动;在排气道关闭后($\alpha_c = 250^\circ$),上述形成的旋涡流动保留下来,经气缸压缩破裂以提高缸内湍流强度,促进燃油雾化和燃烧。

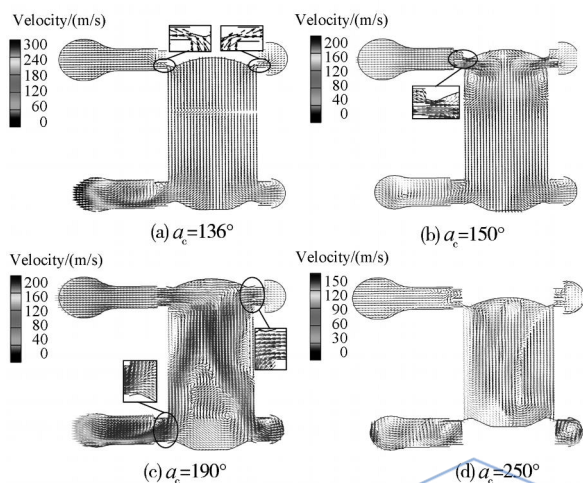


图12 气缸轴截面速度分布

Fig. 12 Velocity distribution on the axial-section of the cylinder

4 结 论

双对置二冲程柴油机具有结构简单、功率密度高等特点,其独特的直流扫气结构能有效提高高速二冲程柴油机的扫气效率,从而提高发动机性能。

本文基于双对置二冲程柴油机直流扫气过程流动特点,应用 AVL FIRE 软件建立了该发动机扫气过程瞬态流动三维 CFD 仿真模型,并对模型进行了验证。

针对额定工况下的扫气过程进行了仿真研究。结果显示,与传统二冲程发动机相比,采用直流扫气方式可较好避免新鲜充量与废气的相互掺

混,有效提高高速二冲程发动机扫气质量,在功率 160 kW,转速 2500 r/min 的额定工况下该发动机扫气效率可达 94 %。

参考文献:

- [1] Franke M, Huang H, LIU Jingping. Opposed piston opposed cylinder (opoc) 450 hp engine: performance development by CAE simulations and testing [R]. SAE Paper 2006-01-0277, 2006.
- [2] Kalkstein J, Rover W, Campbell B. Opposed piston opposed cylinder (opoc) 5/10 kW heavy fuel engine for UAVs and APUs [R]. SAE Paper 2006-01-0278, 2006.
- [3] 刘博, 邓康耀. 二冲程汽油机高空增压功率恢复计算研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1570-1576.
LIU Bo, DENG Kangyao. Computer study on power recovery of turbocharged two stroke spark ignition engine at altitude[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1570-1576. (in Chinese)
- [4] Heywood J B, Sher E. The two-stroke cycle engine [M]. Philadelphia: Taylor and Francis, 1999.
- [5] Blair G P. Design and simulation of two-stroke engine [M]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers Inc., 1996.
- [6] Hofbauer P. Opposed piston opposed cylinder engine for military ground vehicles[R]. SAE Paper 2005-01-1548, 2005.
- [7] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [9] 陈涛, 诸葛伟林, 张杨军. 高压差下增压柴油机进气道流通特性研究[J]. 内燃机工程, 2008, 29(5): 57-61.
CHEN Tao, ZHUGE Weilin, ZHANG Yangjun. Research on flowability in intake port of turbocharged diesel engine at high port pressure drop[J]. Chinese Internal Engine Engineering, 2008, 29(5): 57-61. (in Chinese)
- [10] Laccarino G. Predictions of a turbulent separated flow using commercial CFD codes [J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(4): 819-828.
- [11] Durbin P A. Separated flow computations with the $k-\epsilon v^2$ model [J]. AIAA Journal, 1995, 33(4): 659-664.
- [12] Hanjalic K, Popovac M, Hadziabdic M. A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25(6): 1047-1051.