

柴油机排气管内紊流仿真计算研究

Simulation and Calculation for Turbulent Flow in Diesel Engine Exhaust Manifold

田永海 刘胜 殷玉恩

(中国北方发动机研究所)

摘要: 排气管内部结构对柴油机性能有着重要影响, 通过建立某 6 缸 4 行程一维 (GT-POWER) 整机工作过程循环数值模型, 在一维模型中耦合排气管三维 (STAR-CD) 模型, 对柴油机排气管内的三维流动特性进行了分析: 排气流经弯管后失去其对称性, 拐角后会形成平面流动结构, 很大一部分损失发生在拐角下游的流体重新扩展区域, 曲率增大使压力变化增加; 独立拐角下游切线横穿不同管道的三维压力变量减小速度极快; 在具有低质量流量的过程中, 排气管内部可能会发生局部回流。

关键词: 排气管; 数值仿真; GT-POWER; STAR-CD

Abstract: The internal structure of exhaust manifold has great influence on diesel engine performance. The 3D flow characteristics were analyzed by setting up a 1D numerical model (GT-POWER) for the operating cycle of some 6-cylinder 4-stroke engine, with a 3D exhaust manifold model (STAR-CD) coupling with the 1D model. The results show that the exhaust gas through bent pipes loses its symmetry, and in-plane structures are formed after curvatures. A large portion of loss occurs in the redeveloped area downstream the curvatures. The curvature increases, pressure difference becomes larger. The 3D pressure variant across different pipes at downstream tangent line of independent curvature drops extremely fast. During the process of low mass flow, local reflucence may occur in the exhaust manifold.

Keywords: exhaust manifold; numerical simulation; GT-POWER; STAR-CD

1 前言

排气管内部结构影响到柴油机的充量更换和排气能量的利用, 对柴油机的性能有着重要的影响。通过对排气管内部流场的 CFD 计算, 研究各缸在不同曲轴转角下型腔内气流的流动规律, 反映压力、速度等参数在排气管中的传播、反射、干扰, 还能反映排气管形状、结构等对流动的影响。能够对管道的形状进行完整的优化设计, 为提高发动机排气能量的利用率提供了有效手段。目前, 进排气系统的 CFD 模拟有三种模型可供选择: 一维 (CFD) 模型、三维 (CFD) 模型和混合模型。混合模型是指进排气系统中既有一维模型又有三维模型, 通过两者结合求解整个进排气系统的流动特性, 既利用了一维模拟计算效率高的优势, 又实现了进排气系统中关键部件 (如进气歧管、空气滤清器、排气管、催化转化器等) 形状对发动机性能影响的分析。

本研究首先建立某6缸4行程一维(GT-POWER)的整机工作过程循环数值模型,并根据试验结果进行对比验证模型的有效性。在发动机整机一维(GT-POWER)模型中耦合排气管三维(STAR-CD)模型,进行一维与三维耦合的发动机动态模拟,对柴油机排气管内三维流动特性进行详细分析。

2 模拟平台的建立

2.1 排气管实体模型及网格模型

考虑到排气管结构的复杂性,实体模型构建一定要准确;另外为了保证计算结果能较好收敛,将模型进、出口都进行了适当延长(进口和出口40mm),对出口延长尤为重要,这样处理的作用是可以让气流能充分发展不至于产生回流现象,同时能够保证收敛速度。图1和图2是排气管实体模型和三维计算模型,最左端为出口,从右至左依次为一缸、二缸和三缸。



图1 排气管实体模型

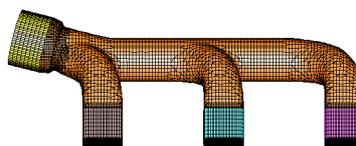


图2 排气管网格模型

2.2 计算条件的设置

一维计算模型使用的是商用软件GT-POWER,为对整机进行模拟,将柴油机系统分解成不同的零部件及组件。例如,可以对排气管进行三维建模,而对柴油机的其它部件进行一维建模。CFD分析不需要拓展到整个系统(有助于保持合理的单元数),通过包含3D效果,仿真将更加精确。

GT-POWER在每一个CFD时间步长通过特殊的连接与3D计算域交换边界值(如速度、压力、温度、密度及组分等);GT-POWER中用于耦合的组件是“CFDComponent”和“CFDConn”。在与STAR-CD软件耦合之前,GT-POWER可以运行几个循环,目的是为CFD区域提供更好的边界条件,以助于减少耦合循环的数目,尽快收敛。另外,可以预先单独运行GT-POWER以获得“CFDComponent”前后的管路的温度、压力、速度等参数;使用GT-POWER中的值初始化CFD软件流场。一旦耦合计算开始,上述做法能提供给CFD域较好的初始条件,CFD软件控制GT-POWER的启动与停止,因此,确保CFD软件中运行的循环数目等于GT-POWER中指定的耦合循环数目(耦合数目=总循环数-预循环数)。设置完成以后,运行Run—Create .dat file,写.dat文件,为一三维耦合计算做准备。

STAR-CD与GT-POWER耦合时采用瞬态计算模式,在计算过程中,认为气流在排气管中是绝热、可压缩的黏性湍流流动,采用FVM把计算区域划分为离散的控制体积网格,在每个控制体积上积分控制方程,形成计算变量的代数方程。

在一个发动机循环内,进气过程是瞬态变化的,因此,计算采用PISO (pressure implicit with splitting of operators)算法。PISO算法包含两个压力校正步,对压力场校正精度高,且较容易得到收敛解。排气管的边界条件如下:进出口均设为速度进口,初始值为零,计算开始后,STAR-CD会自动读取GT-POWER的计算结果,获得进口的流速值。湍流强度为0.05,湍流长度尺度为0.005m,在流体力学中按照点源与点涡组合形成流动的理论,将气体视为理想气体,壁面边界采用壁面函数

处理，壁面温度为固定温度，满足理想气体状态方程。计算时间为 2180° CA，一三维模型耦合仿真的 GT-POWER 模型如图 3 所示。

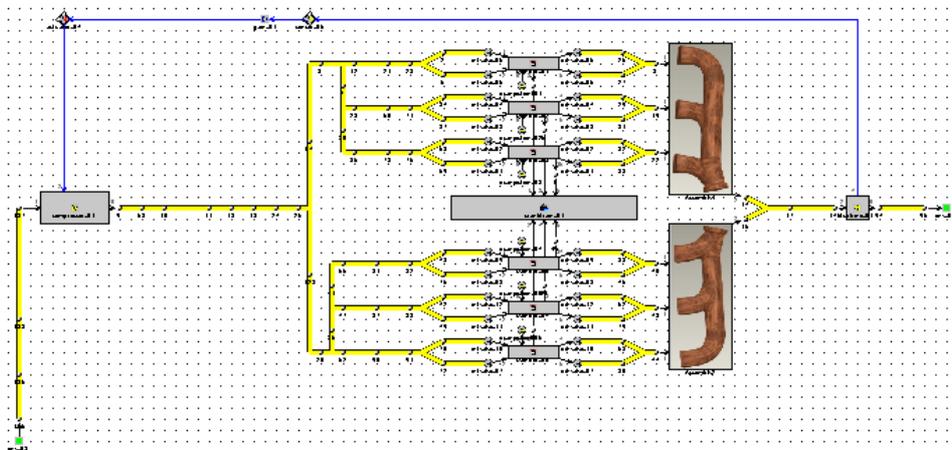


图 3 一三维模型耦合仿真的 GT-POWER 模型

3 仿真结果及分析

分别定义第一缸最大质量流量的 10% (413°CA)、100% (290°CA) 为低质量流量和高质量流量，本文对第一缸最大质量流量的 10%和 100%排气管内三维流动特性进行分析。对排气管进行 3 个循环的一三维耦合仿真，得到了各气缸的质量流量，图 4 是最后一个循环各气缸质量流量。

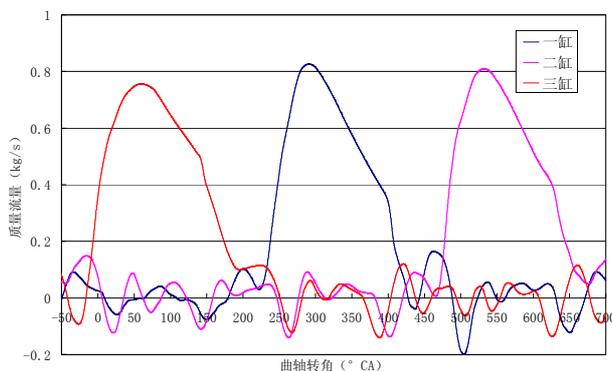


图 4 耦合仿真的质量流量曲线

3.1 低质量流量对排气管内三维流动的影响

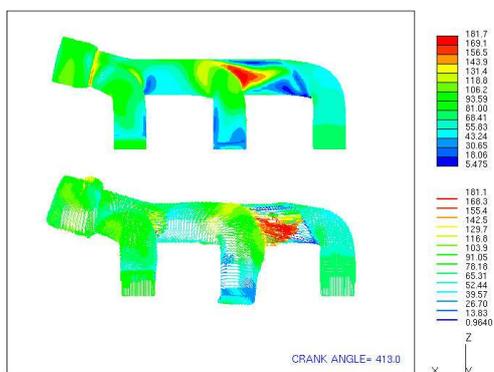


图 5 排气管速度矢量和速度标量图

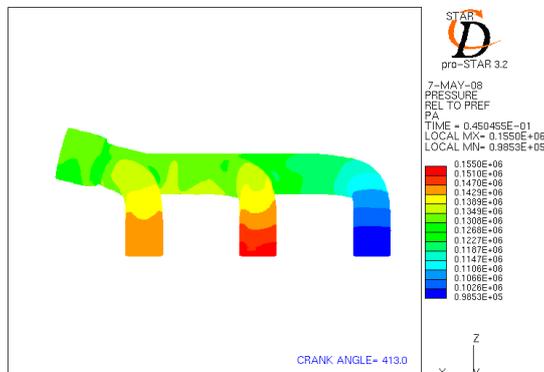


图 6 排气管压力标量图

图 5 和图 6 是排气管内低质量流量速度和压力图，即 413°CA 排气管内气体三维流动。一缸排气门在 389°CA 时关闭，还有部分排气在一缸排气歧管和总管内流动，二缸排气门已打开，但排气还没有进入排气管。一缸排气歧管和总管交汇小曲率半径的一侧压力急剧降低；一缸排气歧管进入总管处和二缸排气歧管入口产生旋涡，造成排气能量损失。从此时的压力来看，一缸排气已使二缸排气歧管内压力升高， 但一缸排气门关闭时排气管内排气流动基本没有影响二缸排气。

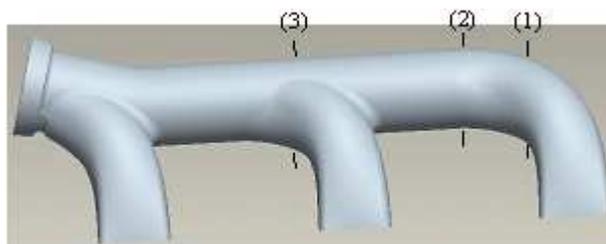


图 7 排气管截图位置

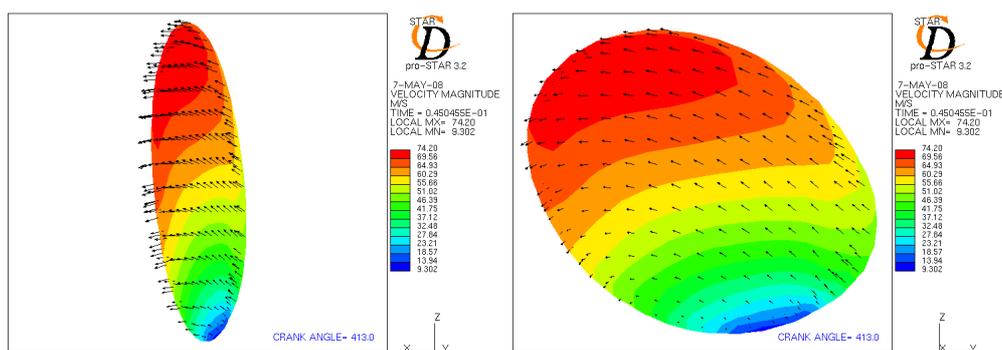


图 8 截图 (1) 平面上的速度场 (轴向速度用等值线表示, 平面速度用向量表示)

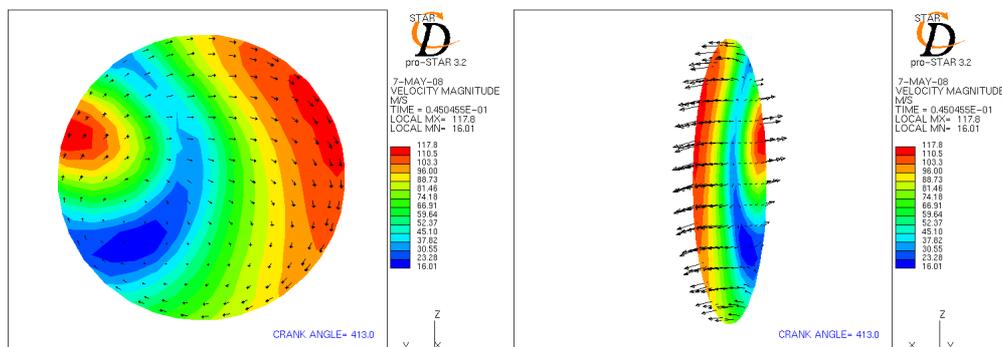


图 9 截图 (2) 平面上的速度场

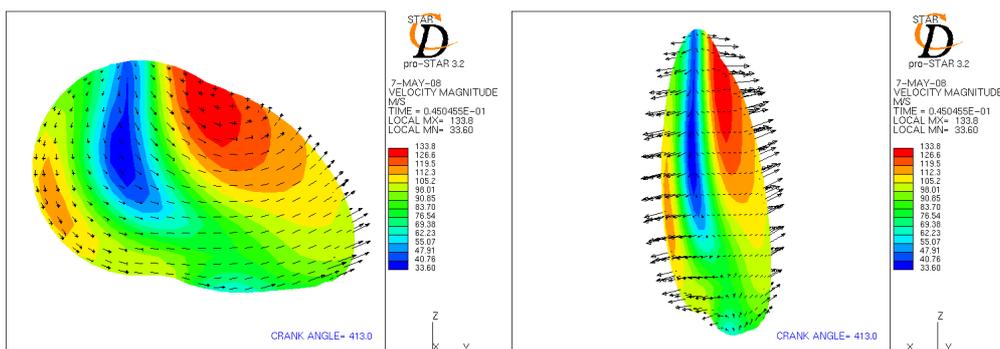


图 10 截图 (3) 平面上的速度场

图 8、图 9 和图 10 分别是图 7 一缸拐角附近、距拐角一倍管径和二缸歧管后的横截面上轴向速度和平面速度的截图。排气管截图 (1) 管内的非定长流表明二次流在第一个主拐角形成，低质量流量时，大部分动能蕴含在二次流中，使其逐步靠近拐角内侧管壁。轴向速度剖面在进入截图 (1) 时失去其对称性；当流体进入截图 (2) 和截图 (3) 时，仍具有相当强度的二次流。

对于截图 (1) 附近的平面，二次流中含有许多能量，联结交汇平面上也含有大量能量。在低质量流量时，二次流结构包含几个旋涡，并且截图 (2) 和截图 (3) 有逆流发生。因此，出口边界变成了入口边界。

3.2 高质量流量对排气管内三维流动的影响

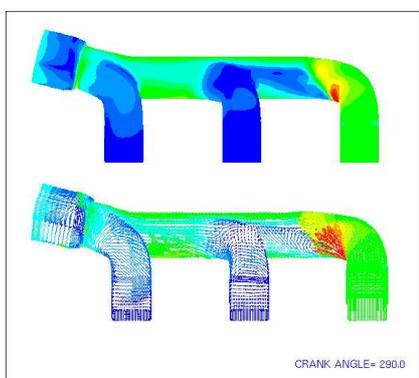


图 11 排气管速度矢量和速度标量图

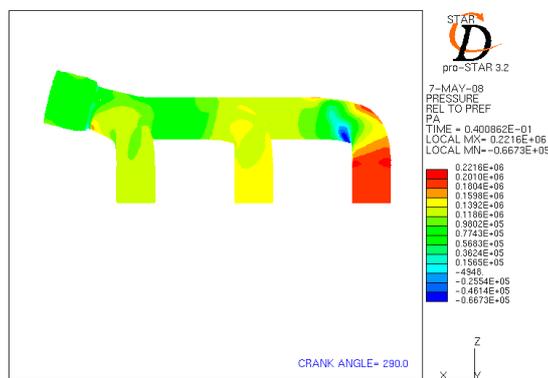


图 12 排气管压力标量图

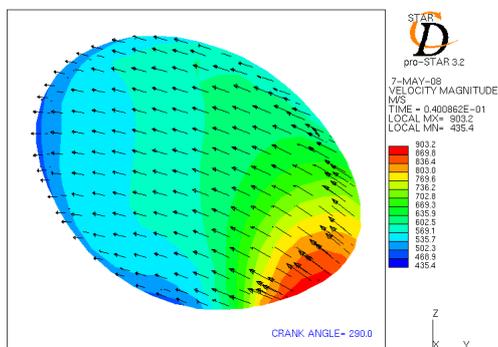


图 13 截图 (1) 平面上的速度场

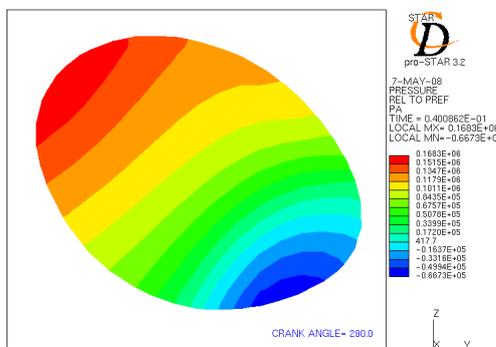


图 14 截图 (1) 平面上的压力分布

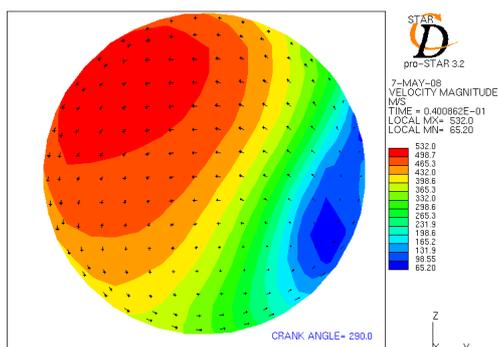


图 15 截图 (2) 平面上的速度场

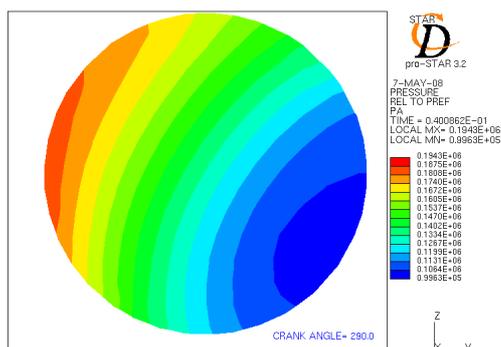


图 16 截图 (2) 平面上的压力分布

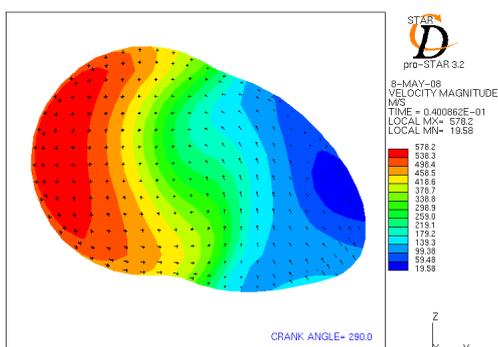


图 17 截图 (3) 平面上的速度场

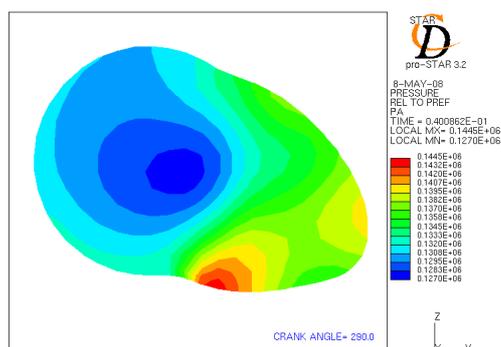


图 18 截图 (3) 平面上的压力分布

由图 11 和图 12 可看出, 高质量流量时, 歧管曲率大的一侧局部区域压力急剧降低、流速升高, 相反的一侧 (曲率小) 局部区域压力急剧升高、流速降低; 排气歧管流入总管的气体碰撞总管壁使总管的局部压力升高, 造成了能量损失。在其它缸歧管与总管交汇处产生流动旋涡, 也造成了能量损失。但相对低质量流量时程度较小。

由图 13、图 15 和图 17 可以看出二次流沿着弯管向下强度变小。尽管二次流的强度沿着下游进一步减弱, 但是很大一部分损失发生在拐角下游的流体重新扩展区域。上游切向上的流体不受拐角存在的影响。当主流转向时, 在垂直流向的方向上形成的压力梯度会平衡部分离心力。

管道内相同横截面上的压力分布见图 14、图 16 和图 18, 横穿管道的压差截面 (1)、截面 (2) 和截面 (3) 约为 2.35 bar、0.95 bar 和 0.175 bar, 说明在进行压力测量时注意弯管横截面上的压力分布是重要的, 也说明独立拐角下游切线横穿不同管道的三维压力变量减小速度极快。

4 结论

1. 各缸排气干扰较小; 但局部因碰壁、回流、旋涡等造成了能量损失。
2. 排气流经弯管后失去其对称性, 拐角后会形成平面流动结构, 很大一部分损失发生在拐角下游的流体重新扩展区域, 曲率增大使压力变化幅度增加。
3. 在进行压力测量时注意弯管横截面上的压力分布是重要的。

4. 独立拐角下游切线横穿不同管道的三维压力变量减小速度极快。
5. 在具有低质量流量的过程中，排气管内部可能会发生局部回流。
6. 高质量流量时，在其它缸歧管与总管交汇处产生流动旋涡，造成了能量损失；低质量流量时，在其它缸歧管与总管交汇处产生流动旋涡较小。

5 参考文献

- [1]周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2]叶明辉, 黄露等. 基于一维、三维及耦合模型的汽油机进气系统优化[J]. 车用发动机, 2007(3).
- [3]殷玉恩, 刘胜, 田永海. 天然气发动机进气不均匀性仿真分析[J]. 内燃机, 2010(2).
- [4]谭建伟等. 基于一维/三维模型耦合仿真的汽车进气谐振器设计[J]. 汽车工程, 2007(10).
- [5]Renberg U. A Comparative Study Between 1D and 3D Computational Results for Turbulent Flow in an Exhaust Manifold and in Bent Pipes. SAE Paper 2009-01-1112.
- [6]OHADI M. M., SPARROW E. M., WALAVALKAR A., ANSAR A. I. 1990 Pressure drop characteristics for turbulent flow in a straight circular tube situated downstream of a bend Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 33 No. 4, pp 583-591.