

柴油机进气集气腔一三维耦合模型仿真

Simulation of diesel intake plenum based on 1D/3D coupling model

殷玉恩 刘胜 田永海

(中国北方发动机研究所)

摘要: 建立了某柴油机整机一维热力学模型和不同容积集气腔三维 CFD 模型,通过一三维模型耦合进行进气系统瞬态仿真研究,根据模拟结果分别计算了不同容积集气腔对应的各缸进气量和进气不均匀度,并对进气不均匀度进行了评价,根据进气量和进气不均匀度确认了最优化的进气系统。

关键词: 进气集气腔; 一三维耦合; 不均匀性; 数值仿真; GT-POWER; STAR-CD

Abstract: A diesel 1D thermodynamics model and several 3D intake plenum CFD models of different volume are set up. A coupling simulation between diesel 1D model and intake system 3D models is performed. The intake massflow and unevenness are calculated on the base of simulation results and then evaluate the intake unevenness, at last the most optimum design is certified considering intake flowmass and unevenness.

Key words: intake plenum; 1D/3D coupling; unevenness; simulation; GT-POWER; STAR-CD

进气系统对发动机的动力性和经济性有重要影响,进气系统优劣的评价标准,除了进气损失和进气量的大小以外,还要有进气均匀性的指标。好的进气系统必须能够充分利用谐振效应,减少流动分离和漩涡,增大进入气缸的气量;还要使进入气缸的新鲜空气还要尽可能均匀分配,使各缸工作稳定,提高发动机工作可靠性。通过优化进气系统,减小各缸进气不均匀性,有利于改善发动机的稳定性,因而对进气不均匀性的分析也非常重要。

在发动机进气系统的各个设计参数中,集气腔容积对谐振效应的影响最大,继而影响发动机的进气不均匀性。如果集气腔内压力环境稳定,有利于消除各缸进气干扰,为进气动效应提供良好条件,同时也改善进气均匀性。

通过建立某柴油机一维整机热力学模型和不同集气腔容积的进气系统三维 CFD 模型,将进气系统三维 CFD 模型嵌在一维热力学模型中进行一三维模型耦合仿真,实现了一维模型和三维模型在计算中实时交换数据,三维模型 CFD 模拟计算的边界条件来自一维热力学模型的计算结果,提高了边界条件的准确性,能够准确模拟进气系统设计对发动机进气不均匀性的影响。

1 进气系统三维 CFD 模型

1.1 进气系统造型和网格划分

在 PRO/E 软件中对进气管内腔进行造型, 其中进气总管和歧管的直径、长度及入射角度和集气腔横截面形状都不改变, 只改变集气腔的横截面积以改变集气腔的容积, 完成进气腔的造型。

计算网格生成是计算流体力学的重要组成部分, CFD 计算网格的类型和数量对仿真计算精度和计算时间有重要的影响。

将集气腔 CAD 模型以 Stl 格式输入到 Pro-Surf 中进行面网格检查和细化, 然后将细化后的面网格文件导入 Pro-Am 生成高品质的进气系统非结构化贴体网格。网格类型采用了 STAR-CD 软件中独有的带边界层的 Trim 网格, 并对重要部位进行了网格细化, 为使气流能够充分发展至不至于产生回流现象, 同时保证收敛速度, 对进口和出口的网格进行了拉伸。最终生成的进气系统网格总数在 6 万至 8 万之间, 其中 4.5 倍单缸容积的进气系统网格模型如图 1 所示。

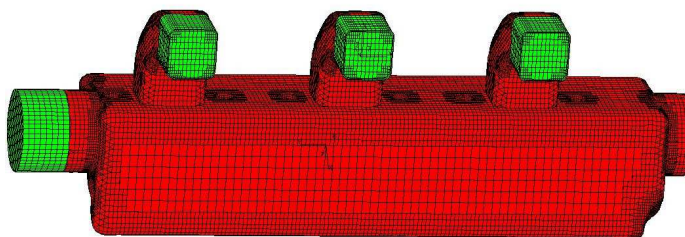


图 1 进气系统网格模型

1.2 模型及设置

采用 High-Reynolds Number $\kappa - \epsilon$ 湍流方程模拟充分发展的流场的流动, $\kappa - \epsilon$ 湍流方程的经验系数 $C_1=1.44, C_2=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_\kappa=1, \sigma_\epsilon=1.3$; 采用标准壁面函数模拟气流在壁面处的运动情况。

在耦合仿真过程中, 进出口边界采用速度进口边界条件, 初始值为零, 计算时 STAR-CD 直接从一维模型中读取速度、压力、温度、密度及组分等作为边界条件, 进出口的湍流强度和湍流长度尺度设定为 $Ti=0.03, L=0.001m$ 。

计算时间步长的设置相当重要, 时间步长太小则计算速度变慢, 计算时间延长; 时间步长太大则又可能在耦合过程中产生网格单元负体积错误, 导致计算失败。在进气系统一三维模型耦合仿真时设置时间步长为 $0.5^\circ CA$ 。

2 整机一维热力学模型

根据所要模拟的实际环境, 充分考虑燃料的多种热力学性质, 基于 GT-Power 软件建立整机一维热力学模型。GT-Power 软件采用有限体积法计算流体连续性方程、动量方程和能量方程组成的耦合方程组, 其计算步骤如下图 2 所示。

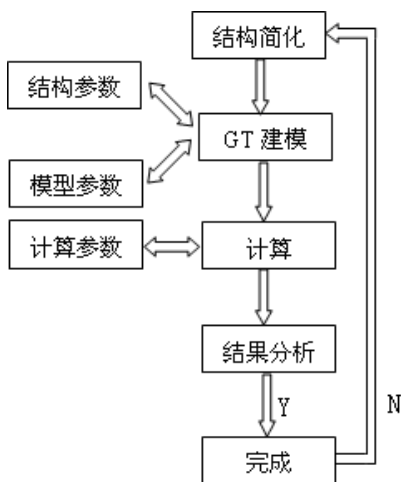


图 2 GT-POWER 计算步骤示意图

一维建模从结构简化开始，将发动机拆分为若干部件，将每一个部件的结构参数，模型参数（如燃烧模型、传热模型、摩擦模型等）输入到相应的 GT 模块中，按照实际发动机中的气体流动方向将所有模块连接起来就构成了发动机的 GT 模型，一三维模型耦合仿真的 GT 模型如图 3 所示。

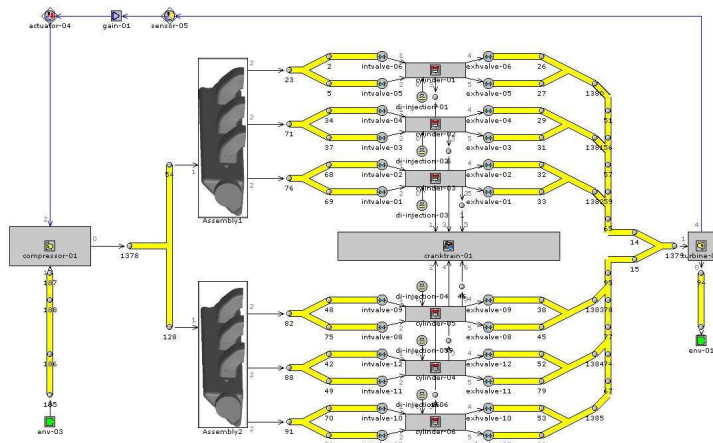


图 3 一三维模型耦合仿真的 GT-POWER 模型

鉴于柴油机采用缸内直喷形式，燃烧模型选择“EngCylCombDIWiebe”，采用三段韦伯函数分别模拟缸内燃烧中的预燃，主燃，后燃三个过程。

摩擦机械损失采用 Chen-Flynn 摩擦模型，计算公式为： $FMEP = \text{Constant part of FMEP} + (\text{Peak Cylinder Pressure Factor} * \text{爆压}) + (\text{Mean Piston Speed Factor} * \text{活塞平均速度}) + (\text{Mean Piston Speed Squared Factor} * \text{活塞平均速度}^2)$ 。

设置总共计算 68 个循环，其中前 65 个循环为 GT 单独计算，一维计算收敛后，再由 GT-POWER 和 STAR-CD 耦合仿真最后 3 个循环。

3 仿真结果及分析

对每个集气腔容积的进气系统进行 3 个循环的一三维耦合仿真，得到了各气缸的流量数据，图 4 为 4.5 倍单缸容积的进气系统左右两排气缸瞬态质量流量随曲轴转角的变化情况。

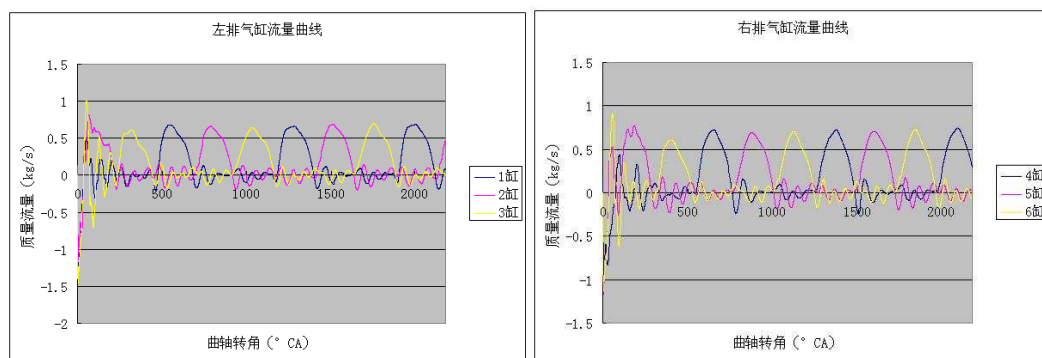


图4 耦合仿真的质量流量曲线

从图4可以看出:第一个循环(0~720° CA)内各缸流量曲线波动很大,这是由于三维计算时的初始条件与进气集气腔内的实际情况并不一致,对计算结果造成很大影响,导致计算结果失真;随着计算的进行,初始条件的影响逐渐变小直至可以忽略,因此后两个循环(720~2160° CA)的流量曲线逐渐趋于平稳,可以认为其计算结果是可靠的。

对最后一个循环的质量流量数据按曲轴转角进行积分,即可得到不同容积集气腔对应的各缸进气量和各缸最大进气不均匀度 σ_{\max} 。

发动机进气的最大不均匀度 σ_{\max} 的定义为:

$$\sigma_{\max} = (Q_{\max} - Q_{\min}) / Q_m \times 100\%$$

式中 Q_{\max} ——歧管最大出口质量流量, kg/s

式中 Q_{\min} ——歧管最小出口质量流量, kg/s

式中 Q_m ——歧管平均质量流量, kg/s

不同容积集气腔各缸的进气量平均值和最大进气不均匀度如图5所示。

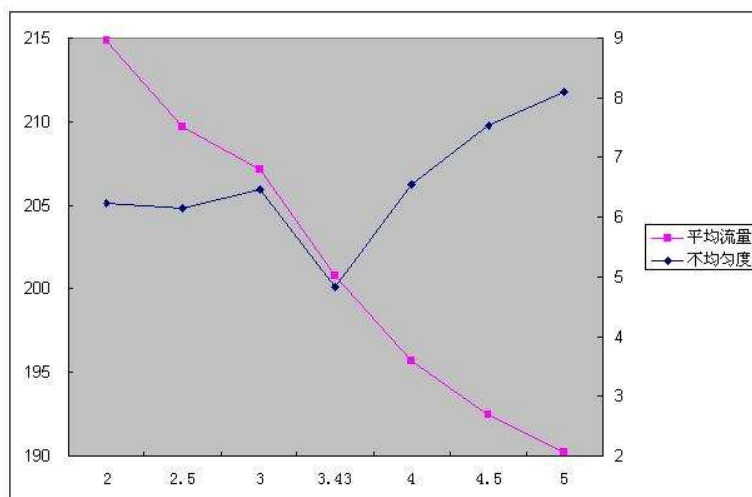


图5 耦合仿真的质量流量曲线

由图5可以看出随集气腔容积的增大,各缸平均进气量逐渐下降,发动机使用2倍单缸容积的集气腔时进气量平均值比5倍单缸容积的集气腔的进气量平均值大13%,这是因为随集气腔容积增大,进气的谐振效应得不到有效利用,进气效率下降了;不同容积的集气腔的进气不均匀性差别很

大, 3.5 倍单缸容积的集气腔时各缸进气不均匀性最小, 随进气腔容积增加, 进气不均匀性反而增大了。

综合考虑进气量和进气不均匀度两个指标, 确认 3.5 倍集气腔容积时发动机性能和可靠性达到最优。

4 结论

1. 一三维耦合仿真进行进气不均匀性计算, 能充分考虑活塞运动和气门启闭等动效应对进气不均匀度的影响, 能比较精确地计算发动机各缸进气的均匀度。

2. 集气腔容积为 3.5 倍单缸容积时, 进气不均匀性最小, 达到小于 5% 的指标, 可以满足发动机性能和可靠性的要求, 是最优化的折衷选择。

5 参考文献

- [1] 周龙保编 《内燃机学》机械工业出版社 2005
- [2] 王福军编 《计算流体力学分析》清华大学出版社 2004
- [3] 蒋炎坤编 《CFD 辅助发动机工程的理论与应用》科学出版社 2004
- [4] 王晗 蔡忆昔 发动机进气系统不均匀性的三维数值模拟 《小型摩托车与内燃机》2007 年第三期
- [5] 张国昌 燃气发动机进气不均匀性试验研究 《车用发动机》2009 年第二期
- [6] 江国华 温苗苗 EQD180N-20 型发动机进气不均匀性分析 《武汉理工大学学报》2006 年第六期
- [7] 罗马吉 陈国华 进气管内三维稳态流动特性的数值仿真 《小型摩托车与内燃机》2001 年第二期
- [8] Mark Claywell, Donald Horkheimer. Improvement of Intake Restrictor Performance for a Formula SAE Race Car Through 1D and Coupled 1D/3D Analysis Methods [C]. SAE Paper2006-01-3654
- [9] Z. Liu, S. F. Benjamin, C. A. Roberts, H. Zhao, A. Arias-Garcia. A coupled 1D/3D simulation for the flow behavior inside a close-coupled catalytic converter [C]. SAE Paper2003-01-1875