

基于一维-三维耦合模拟的发动机进气歧管优化

Optimization of Engine Intake Manifold Based on 1D-3D Coupling Simulation

尹凌^{1,2}, 杨汉乾¹, 邓邦林^{1,2}, 冯仁华^{1,2}, 赵智超^{1,2}

(1 湖南大学先进动力总成技术研究中心, 湖南 长沙 410082;

2 湖南奔腾动力科技有限公司, 湖南 长沙 410205)

摘 要：基于某六缸天然气发动机的两种不同进气歧管的设计方案，用 ICEM 划分六面体网格，利用 GT-POWER 和 STAR-CD 软件，进行一维-三维耦合模拟计算。分析最大扭矩点稳态工况下两种进气歧管各缸进气的均匀性，以及两种进气歧管对整机动力性能的影响。计算结果表明，采用方案二结构的进气歧管，在进气均匀性和整机动力性能方面都更为优越。

关键词：一维-三维耦合；进气歧管优化；GT-POWER；STAR-CD

Abstract: The two types of intake manifold for a six-cylinder nature gas engine were studied in this paper. The computational grids were generated by ICEM. And then 1D-3D coupling simulation was done through GT-POWER and STAR-CD. The uniformity of intake system each cylinder were analyzed at the maximum torque point under the steady condition. The dynamic performance of two types for engine was compared. The results show that the second intake manifold is better than the first considering of the two aspects mentioned above.

Key words: 1D-3D coupling; Optimization of intake manifold; GT-POWER; STAR-CD

1 前言

进气系统的结构对发动机的性能有重要影响。评价进气系统优劣的标准，除了充气效率的高低，还应该包括各缸进气均匀性的指标。好的进气系统不仅能够充分利用谐振效应，减少流动分离和漩涡，降低进气损失，增大进气量；还要使进入气缸的新鲜空气尽可能均匀分配，使各缸工作情况均匀，提高发动机工作的平稳性。

基于 GT-POWER 的一维 CFD 整机工作过程数值循环模拟，适用于发动机整机性能开发的计算。通过优化进排气系统的管道的长短、管径、布置形式等结构参数，能达到提高发动机动力性和降低燃油消耗的设计要求。但是对于管道内流体在关键位置的损失及各缸进气流量均匀性的分析，就需要借助三维 CFD 软件。

本计算基于某六缸稀燃发动机一维计算的性能数据，以及两种不同的进气歧管的设计方案。分别对两种进气歧管进行三维建模，并在 ICEM 中生成网格，导入三维 CFD 分析软件 STAR-CD，并与标

定好的整机一维 GT-POWER 数模进行一维-三维耦合，分析两种方案对发动机各缸进气均匀性及性能的影响。

2一维-三维耦合模型的建立及设置

原机基本技术参数如表 1所示。

表 1 发动机基本技术参数

名称	单位	参数值
缸径	mm	105
行程	mm	125
压缩余隙	mm	0.8-1.2
压缩比		11
连杆长度	mm	210
点火顺序		1-5-3-6-2-4
冲程数		4

三维 CFD 计算能得到比较精确的结果。然而，若对整个系统进行三维计算则需要花费大量的时间并要求更高的计算机配置，以目前计算机的速度来完成，并且时间周期长。因此，在标定好的一维数模的基础上，我们只对进气歧管进行三维建模，并代替一维模型中原歧管模块，进行一维-三维耦合。这样，将在保证计算精度的条件下提高计算效率。对发动机各缸进气均匀性分析的工况点为最大扭矩点 (1500RPM)，对发动机性能分析的工况点为整个外特性。

2.1在 GT-power模型中的相应设置

首先应该进行一维建模并校准，在外特性工况上，将模型计算的扭矩和比油耗等参数与试验值相比较，以验证模型的有效性。

在校准的模型的基础上，创建并设置好“CFDComponent”模块，取代原来的进气歧管模块，如图 1 所示。创建“*.dat”文件，将此模块与三维模块实现实时数据连接。本例总计计算 70 个循环，其中前 50 个循环只进行一维计算，达到稳定后，再进行一维-三维的耦合，即后面 20 个循环为耦合计算。

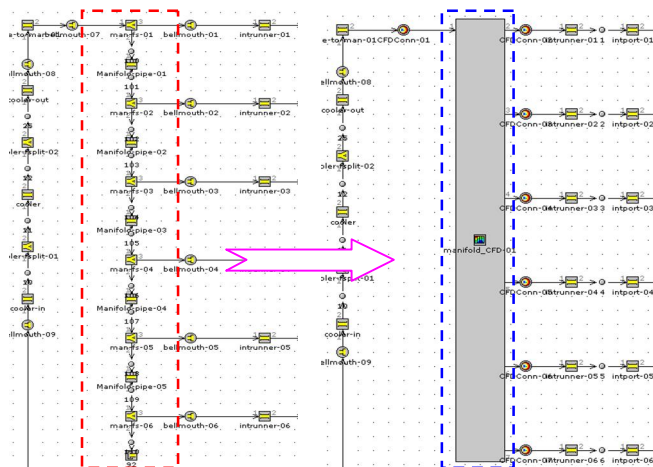


图 1.耦合模型 GT 中进气歧管的替换

2.2 三维数模及网格的建立

通过 PRO.E 建立两种进气歧管的三维数模,生成 STL文件。再将两个歧管三维数模分别导入 ICEM, 在其中生成六面体网格。为了实现与一维耦合,将进气歧管各进出口端各拉伸一段长度,该长度应与一维模型中相连接的管道设置的离散长度相当。图 2和图 3分别是两种方案的网格模型。从图中可以看出,方案一的各缸进气管道相对较长而弯,而方案二的管道较短,其中方案一的网格数为 20316,方案二的网格数为 27088

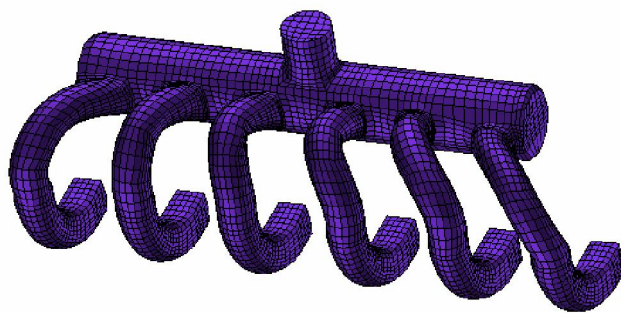


图 2 .方案一网格

2.3 STAR-CD中的边界及初始条件的设置

将三维数模网格模型导入 STAR-CD, 对其进行进出口边界和壁面边界以及流动模型的设置。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。在这里计算时间步长为 耦合开始前 10度曲轴转角的时间步长为 0.5°CA , 之后时间步长为 1°CA 。流动模型采用高雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型,总管和歧管的进出口在 Star-CD中设置为 Inlet边界类型,三维中的瞬态边界条件由一维 GT-Power实时提供。

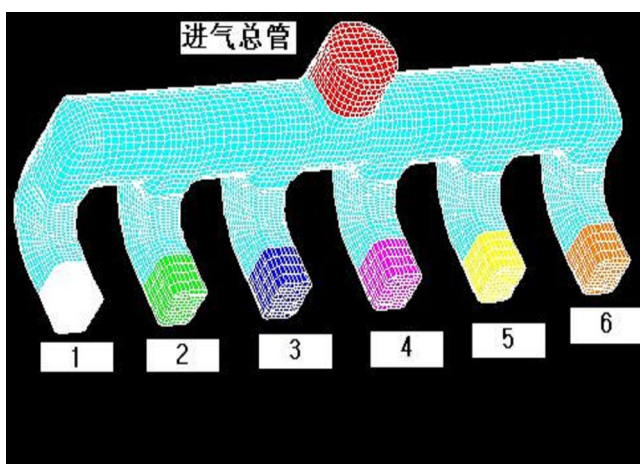


图 3 . 方案二网格

3 各缸进气均匀性的分析

计算完成后分析结果。每隔 120CA , 对两种方案进气歧管剖面切片,生成进气流量的云图,分别如图 4和图 5所示。图中能清晰分辨出每缸进气时的流量与其他缸的歧管明显不同,但具体的均匀性还需进行具体的数据对比。从图 5可观察到,方案二中各缸均存在不同程度窜气现象,如果窜气达到一定量,将影响发动机的性能,而方案一不存在类似窜气。

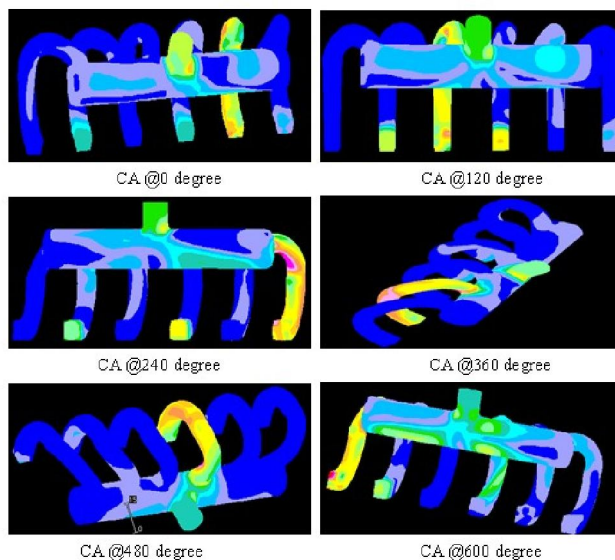


图 4.方案一各缸进气流量对比

为了评价各缸进气的不均匀性,引入各缸流量平均值,各缸流量偏差,以及标准差等参数。分别定义如下:

$$\text{各缸流量平均值: } \bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$$

$$\text{各缸流量偏差: } \Delta_i = x_i - \bar{x}$$

$$\text{标准差: } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

其中 n 为总缸数, i 等于 1,2,3,4,5,6, x_i 为第 i 缸的进气量。

标准差是一种衡量数据分布的分散程度的指标,用以反映数据值偏离算术平均值的程度。标准差越小,这些值偏离平均值就越少,反之亦然。

3.1 方案一进气均匀性分析

从图 6 中分析可知,由于前 50 个循环在 GT-POWER(一维)中计算,标准差的值很小,因为一维计算没有考虑空间流动分布,反映不了各缸的进气的差异以及均匀性。从第 50 个循环到第 70 个循环为一维和三维耦合计算,一维计算考虑到管内压力波动现象,而三维计算考虑到了各进气支管流动的损失以及进气流量的均匀性。因此,图中很好的反映了流量标准差值,耦合计算稳定后标准差约为 0.6g/s

图 7 反映的是各缸在第 50 个循环到第 70 个循环的进气流量的偏差。图中正值表示其气流量大于平均值,负值表示气流量小于平均值。从耦合计算的结果可以看出,此方案中第四缸的进气量最大,大于平均值约 0.6g/s;

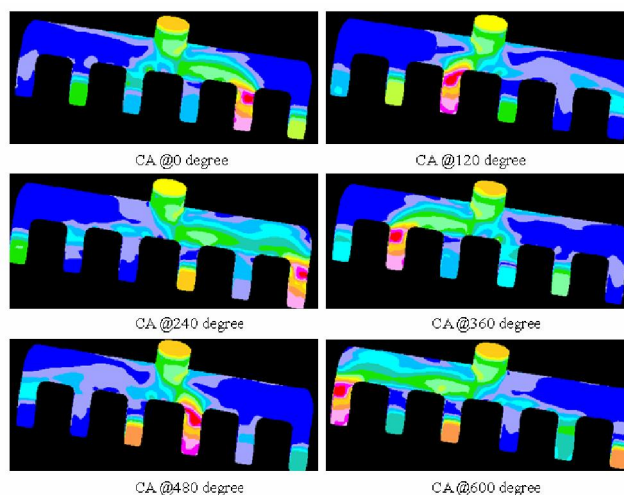


图 5.方案二各缸进气流量对比

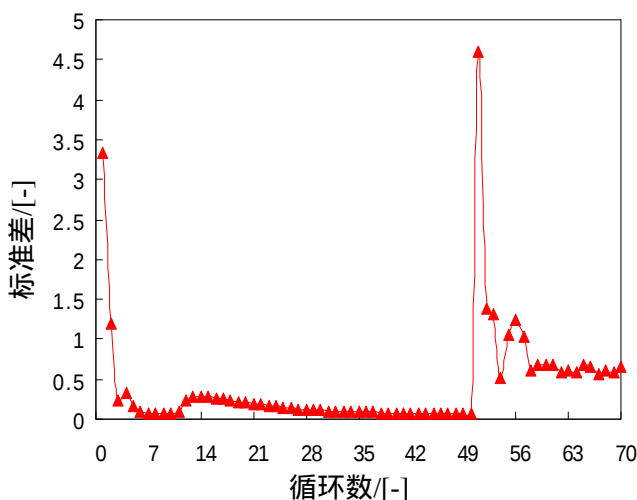


图 6.方案一标准差

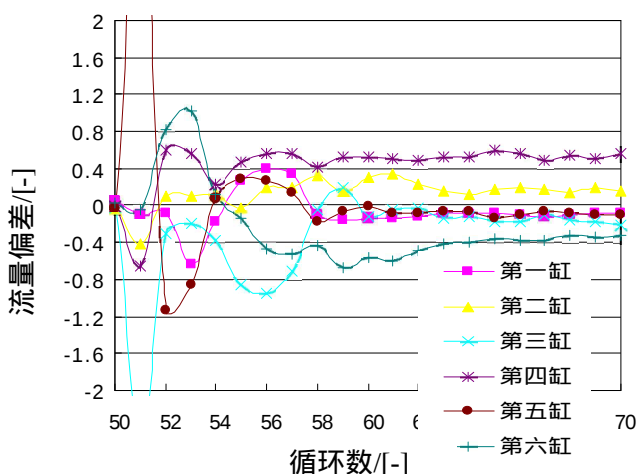


图 7.方案一各缸偏差

而第六缸进气量最小,约小于平均值 0.4g/s 。其余各缸的进气量的偏差稳定后在 -0.2g/s 到 $+0.2\text{g/s}$ 之间。这说明图 4 揭示的窜气量比较多,影响了各缸新鲜进气量的均匀性。

3.2 方案二进气均匀性分析

图 8 反映的是较短进气歧管的标准差,同上一方案的计算设置一样,前 50 个循环在 GT-POWER(一维)中计算,各缸偏差很小。从第 50 个循环到第 65 个循环为一维和三维耦合计算。从耦合计算的结果可以看出,此方案中稳定后最终的标准差约为 0.4g/s , 小于方案一的计算值。

同时,从图 9 中可以看出,在第 50 到 65 个循环,该方案的各缸偏差量稳定的收敛在正负 0.4g/s 以内,说明均匀性比较好。图中显示,此方案进气量最大的为一缸,稳定后偏离平均值约为 0.3g/s ;进气量最小的为第三缸,偏离平均值也在 -0.4g/s 之内。这说明图 5 揭示的窜气量比较少,没有影响各缸新鲜进气量的均匀性。因此,整体来说,这种方案的均匀性较好。

4 两种方案对发动机性能的影响

对于两种不同进气歧管的方案,由上文可知,其进气均匀性是有差别的。同时,由于发动机的进气过程的优劣,包括进气流量、冲量系数、进气均匀性等,都将对发动机整机性能产生一定影响。本文仅就二者的外特性扭矩进行对比分析,如图 10 所示。从图中分析可知,在不同的转速下,方案二相比于方案一,外特性扭矩都有不小幅度的提升,表明其动力性更优越。

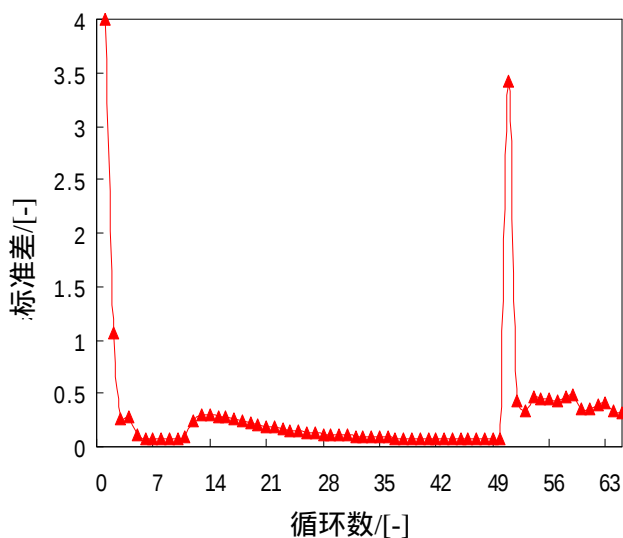


图 8. 方案二标准差

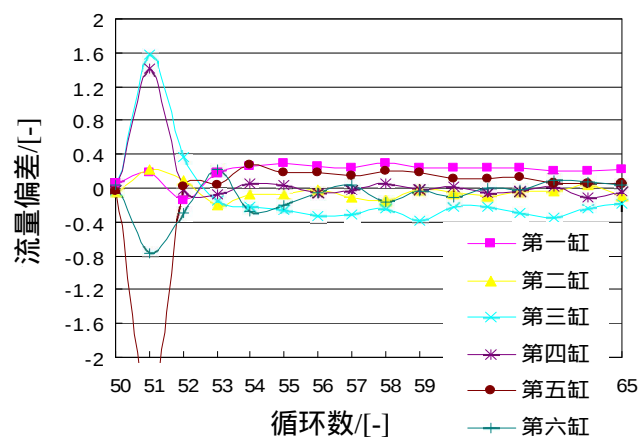


图 9. 方案二各缸偏差

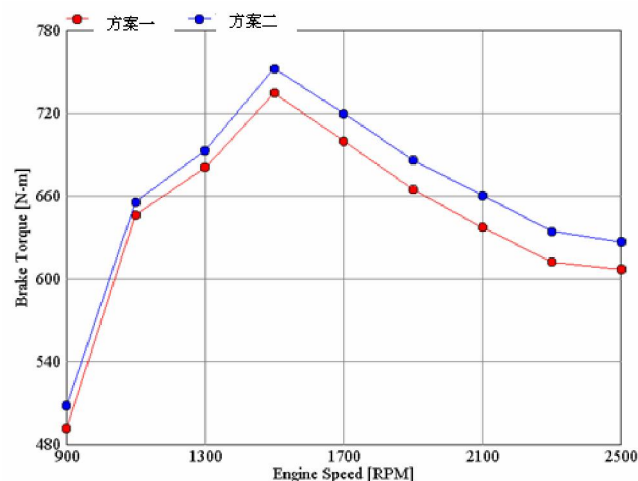


图 10. 两种方案扭矩对比

5 结论

通过进气歧管一维 -三维耦合模拟，对比两种方案的计算结果，可得到如下结论：

- 1 由于一维计算没考虑空间流动分布，即前 50个循环两种方案都分辨不出进气均匀性。
- 2 由耦合计算结果可得，方案一的各缸进气的标准差较大，各缸的流量偏差也较大，且存在窜气现象，说明其进气均匀性不如方案二。
- 3 由二者的性能分析可知，方案二的外特性扭矩要优于方案一。

综上所述，可知方案二在进气均匀性以及整机动力性能上都要优于方案一。因此，可以初选此方案，为本机的下一步的优化设计提供重要依据。

参考文献

- [1]. GT-SUITE v6.2 User Manual
- [2]. STAR-CD v3.26 User Manual
- [3]. 蒋德明 《高等内燃机原理》 西安交通大学出版社 2002
- [4]. 周龙保 《内燃机学》 机械工业出版社 2005