

# 汽油机进气歧管 CFD 分析与改进

## CFD Analysis and Improvement of Intake Manifold for a Gasoline Engine

汪源利 王伟民 蔡志强

(东风汽车公司技术中心 湖北 武汉 430056)

**摘要：**本文对某款汽油机的进气歧管进行稳流试验，利用 CDAJ 公司的 STAR-CCM+ 软件建立进气歧管分析模型，以试验数据来标定流动模型，同时对改进后的进气歧管的流动特性进行 CFD 分析，分别计算出两种进气歧管的最大不均匀度。结果表明改进后的不均匀度得到一定的降低，更有利于提高发动机进气和燃烧的质量。

**关键词：**汽油机 进气歧管 数值模拟 STAR-CCM+

**Abstract：** The steady flow test was applied in the intake manifold of gasoline engine in this paper. The analysis model of intake manifold was made by STAR-CCM+, and then was calibrated by the test data. At the same time, some CFD simulation of the improved intake manifold had been done in order to study its flow characteristic, max unevenness of the two models were also calculated. Results showed that the improved model was better than old model, and it was more conducive to raising the quality of engine intake and combustion.

**Keywords：** gasoline engine; intake manifold; numerical simulation; STAR-CCM+

### 1 前言

在轿车用汽油机上，进气歧管是进气系统最重要的部件，其进气的不均匀性将直接影响到各缸空气与燃油的混合程度，从而影响燃烧过程的组织，使各缸的燃烧过程产生差异，最终影响到整机性能。由此可见，进气歧管的结构直接影响到发动机各缸燃烧的质量和发动机性能指标。由于汽油机进气歧管中的气体流动十分复杂，因此可利用三维 CFD 模拟仿真技术建立相应分析模型，从而较准确地预测其流动性能。

当今的 CFD 模拟分析软件有 STAR-CD、FLUENT、AVL-FIRE 等，本文采用 CDAJ 公司的 CFD 分析软件 STAR-CCM+ 建立某款汽油机进气歧管的流动模型，并利用相应的稳流试验数据进行流动模型标定，然后分析优化后的进气歧管的流通特性及进气不均匀度，与原方案比较，为进气歧管的结构改进设计、减小流动阻力提供了一定的理论依据，保证了优化后的汽油机性能。

### 2 进气歧管稳流试验

进气歧管稳流试验是参考进气道稳流试验原理，在稳流试验装置上进行。进气歧管稳流试验装置如图 1 所示。进气歧管稳流试验采用的是变压差方法。试验中，选用直径为 35mm 的缸筒。试验压差工况由计算机设定，试验数据由计算机进行采集。

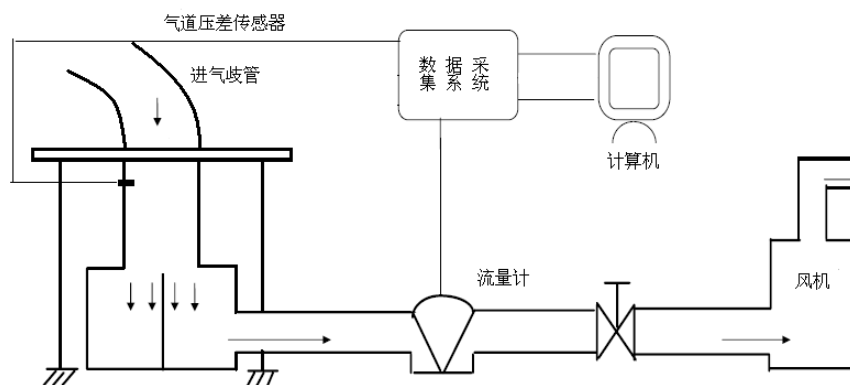


图 1 进气歧管稳流试验装置示意图

### 3 流动模型建立及验证

#### 3.1 几何模型建立及网格划分

运用 CATIA 工具进行歧管模型流体计算域的空间抽取工作，歧管 CAD 模型如图 2 所示。之后将其以 stl 格式导入 STAR-CCM+中进行面网格、体网格的生成工作。运用 STAR-CCM+自带的网格生成工具生成的歧管计算网格如图 3 所示。所生成的网格类型为多面体网格，体网格数为 100 万。

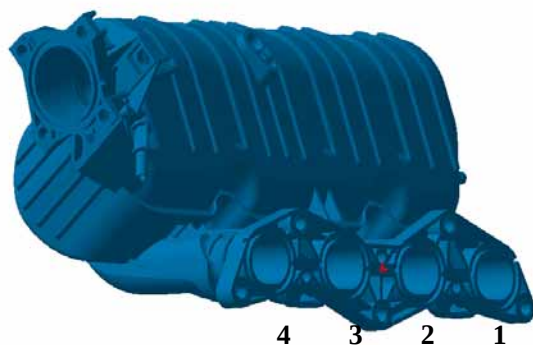


图 2 进气歧管 CAD 示意图

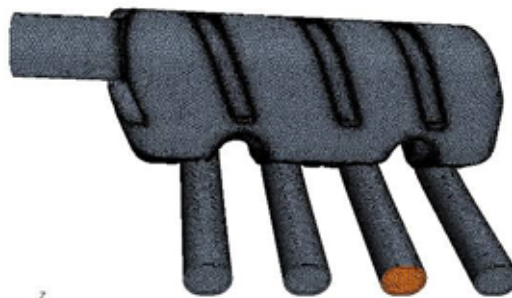


图 3 进气歧管体网格示意图

#### 3.2 边界条件参数设定

模拟计算中的初始条件如下： $p=101325\text{Pa}$ 。边界条件设置如下：进口设为为滞止入口，静压  $p=0\text{Pa}$ ，温度与试验环境温度一致， $T=288.15\text{K}$ ，粘性系数= $1.78 \times 10^{-5}\text{Ns/m}^2$ ，计算出口压差与试验压差一致。湍流模型采用标准  $k-\epsilon$  模型，收敛精度为  $10^{-4}$ 。

#### 3.3 计算结果与试验结果对比

通过模拟计算得出试验压差各歧管出口的质量流量，与试验值对比如表 1、图 4 所示。

表 1 计算值与试验值对比

| outlet     | 1    | 2    | 3    | 4    |
|------------|------|------|------|------|
| 试验压差 (Pa)  | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 |
| 试验流量 (g/s) | 37.9 | 48.5 | 55.7 | 66.2 |
| 计算流量 (g/s) | 36.4 | 48.7 | 55.1 | 65.7 |
| 计算误差 (%)   | -4.0 | 0.4  | -1.0 | -0.8 |

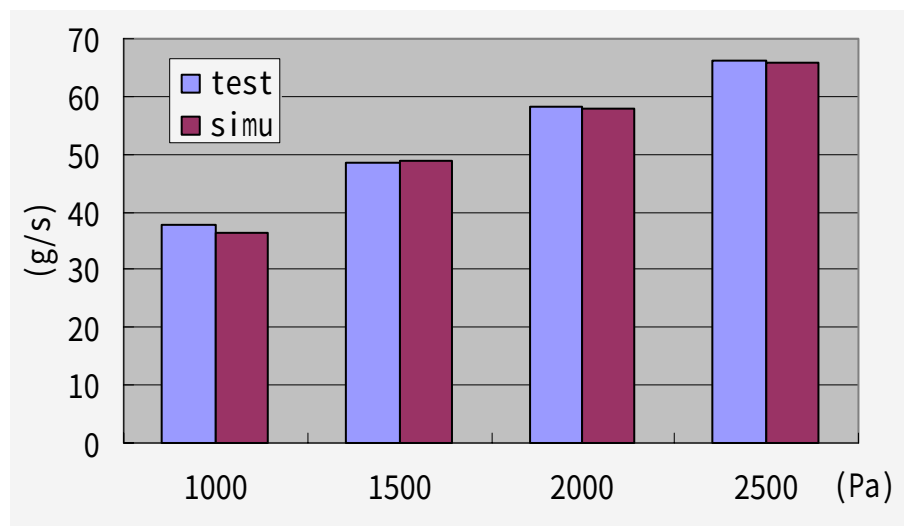


图 4 计算值与试验值对比示意图

从表 1、图 4 中，可以看出，由模拟计算得到的进气歧管的质量流量与稳流试验测得的质量流量相差较小，相对误差在 5% 以内，说明模型可信。

#### 4 原型机进气歧管模拟结果分析

依据标定的计算模型进行 2000Pa 压差情况下各歧管的 CFD 分析，比较其质量流量，得出其不均匀性。各歧管质量流量如表 2 所示。歧管的最大不均匀 E 的计算公式如式 1 所示。

$$E = (Q_{\max} - Q_{\min}) / Q_{me} \quad (1)$$

其中： $Q_{\max}$  歧管出口最大流量  
 $Q_{\min}$  歧管出口最小流量  
 $Q_{me}$  各歧管出口平均流量

表 2 2000Pa 压差下的最大不均匀度

| outlet         | 1    | 2    | 3    | 4    |
|----------------|------|------|------|------|
| 计算流量(g/s)      | 53.1 | 53.9 | 55.7 | 57.8 |
| $Q_{me}$ (g/s) | 55.1 |      |      |      |
| E (%)          | 8.5  |      |      |      |

从表 2 中可以发现 outlet1、2 的质量流量偏低，进而导致进气歧管不均匀度偏大。由此对进气歧管的速度场、流场进行分析。

##### 4.1 原方案进气歧管压力场分析

对原方案进气歧管的数值模拟结果得到各出口开启时压力分布（图 5）和速度矢量分布（图 6）。从图 5 中可以清楚地看到当各歧管开启时，稳压腔内的压力比较均衡，未有明显突变的部位。但在稳压腔与歧管的连接处则出现较明显的压力变化。同时发现图中箭头标记的位置，由于该处歧管管路的弯曲半径较大，导致此处的气流压力变化较大，流速变化也较大。在歧管的直管段，其压力分布就比较均匀。

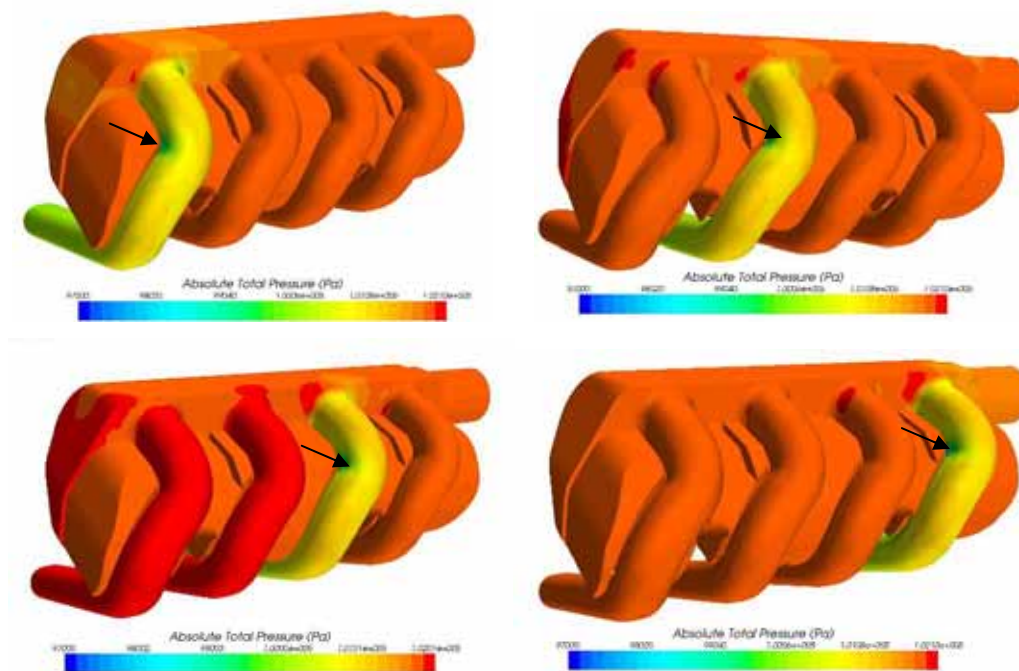


图5 原方案各歧管开启压力分布示意图

#### 4.2 原方案进气歧管速度场分析

从图 6 中可以看到, 由于进口与稳压腔平行, 当各出口开启时, 气体进入稳压腔前端的速度场分布几乎一致。但由于出口位置的不同, 造成稳压腔内的速度场分布有较大区别。outlet1 开启时, 在稳压腔的末端即 outlet1 歧管与稳压腔的连接处形成较大的涡流而损失能量, 导致 outlet1 的流量偏小。outlet2、outlet3 的速度场分布与 outlet1 近似, 且均在歧管与稳压腔连接处位置产生涡流, 但涡流大小依次减小, 从而使出口的流量有所增加。

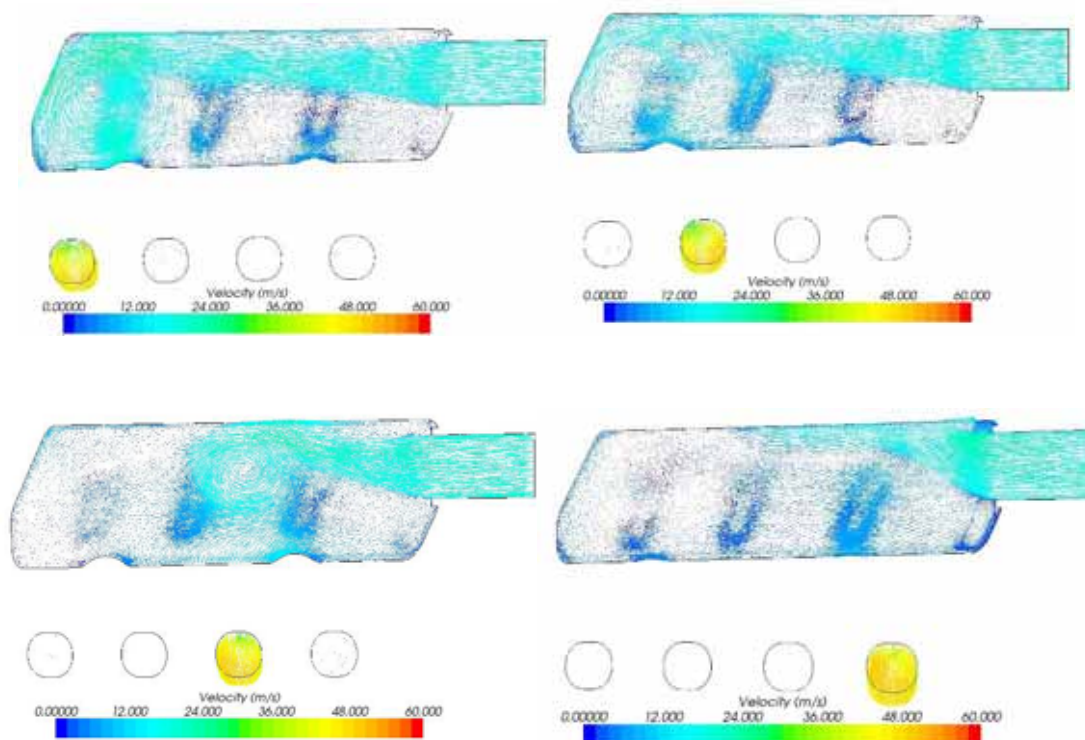


图6 原方案各歧管开启速度截面矢量图

### 4.3 进气歧管形状的改进

鉴于以上对原进气歧管的压力场和速度场的分析,发现造成不均匀度大的可能原因是进口的位置及角度。由于进口与稳压腔平行,其进口气流沿进气方向流速较大,流到稳压腔末端与其壁面相互作用,从而产生较大的涡流而损失能量,导致该出口的流量较小。随着气流进入稳压腔,离进口位置越近的 outlet,其涡流越小、流量越大。由此,在保证进气流量的基础上,提高进气歧管的均匀性,可将进气歧管的进口与稳压腔成一定夹角,使进口的气流在进入稳压腔大约 1/2 的位置与腔壁相互作用。经过修改后的进气歧管的模型如图 7 所示:



图 7 改进后进气歧管体网格示意图

## 5 改进后的进气歧管数值模拟结果分析

针对改进后的进气歧管模型,抽取流体空间,导入 STAR-CCM+中进行网格划分,并设定与原方案进气歧管相同的边界条件。经过三维流动计算后得到的结果如表 3 所示:

表 3 改进前后各歧管流量对比表

| (2000Pa 压差下优化前后各出口流量对比) |         |         |         |         |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 名称                      | outlet1 | outlet2 | outlet3 | outlet4 |
| 原方案 (g/s)               | 53.08   | 53.88   | 55.65   | 57.77   |
| 优化方案 (g/s)              | 55.54   | 56.39   | 57.7    | 58.32   |
| 流量提高率 (%)               | 4.6     | 4.7     | 3.7     | 1.0     |

从表 3 中可以看到优化后的进气歧管各出口在 2000Pa 定压差的情况下,较原进气歧管的各出口的流量均有一定提高,尤其是 outlet1 和 outlet2。根据公式 1-1,得出优化后的进气歧管在 2000Pa 压差下的最大不均匀度是 4.88%,基本满足进气歧管的不均匀度要求。下面对优化后的进气歧管的压力场和速度场进行相应的分析。

### 5.1 改进后的进气歧管压力场分析

图 8 示优化后进气歧管压力场分布图。从图中可以看到当各 outlet 开启时,优化后的进气歧管的稳压腔内的压力分布较均匀。压力突变的位置依然是稳压腔与歧管连接处和歧管弯曲较大的部位。在该处的压力变化较大,气流流速的变化也很大,可能造成不良后果。为了避免不良后果的发生,可将出口歧管与稳压腔的过渡连接部位圆角增大一些,并稍微增大连接处管径,过渡部位尽量设计得圆润些,使得气体经过时湍流减小。



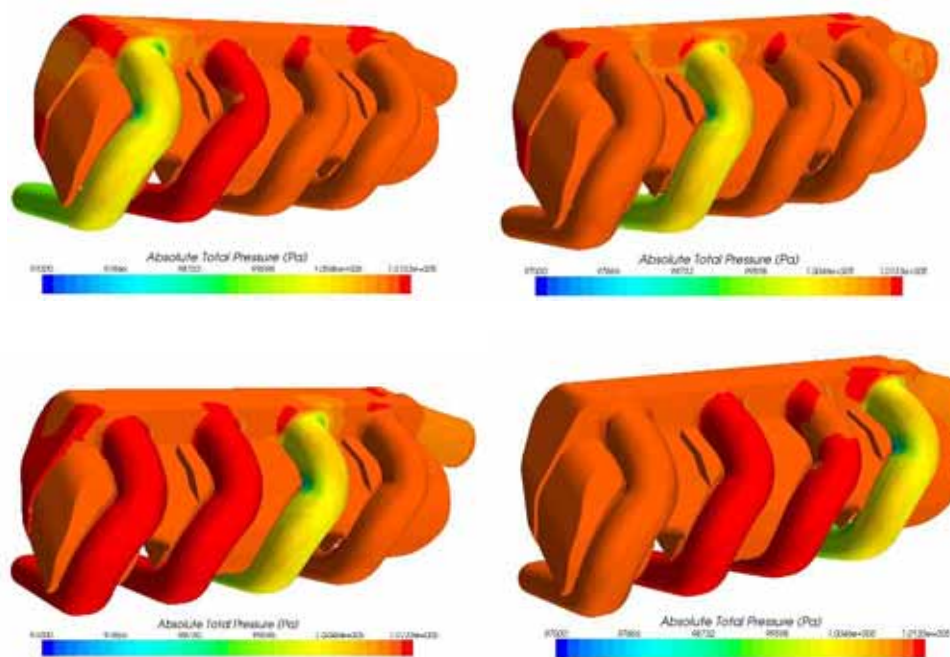


图 8 优化方案各歧管开启压力分布示意图

## 5.2 改进后的进气歧管速度场分析

图 9 所示为优化进气歧管的速度场分布。从图 9 中可以看到，由于进气歧管的进口位置和角度的变化，进口气流进入稳压腔后，在腔体大约 1/2 处与稳压腔壁面发生相互作用。当 outlet1 开启时，其在稳压腔内形成的涡流较原方案偏小些。随着其他出口的依次开启，稳压腔内的涡流大小依次减小，且流量随之增大。其主要是由于涡流的减小而使损失的能量减小，从而增加了出口的流量。

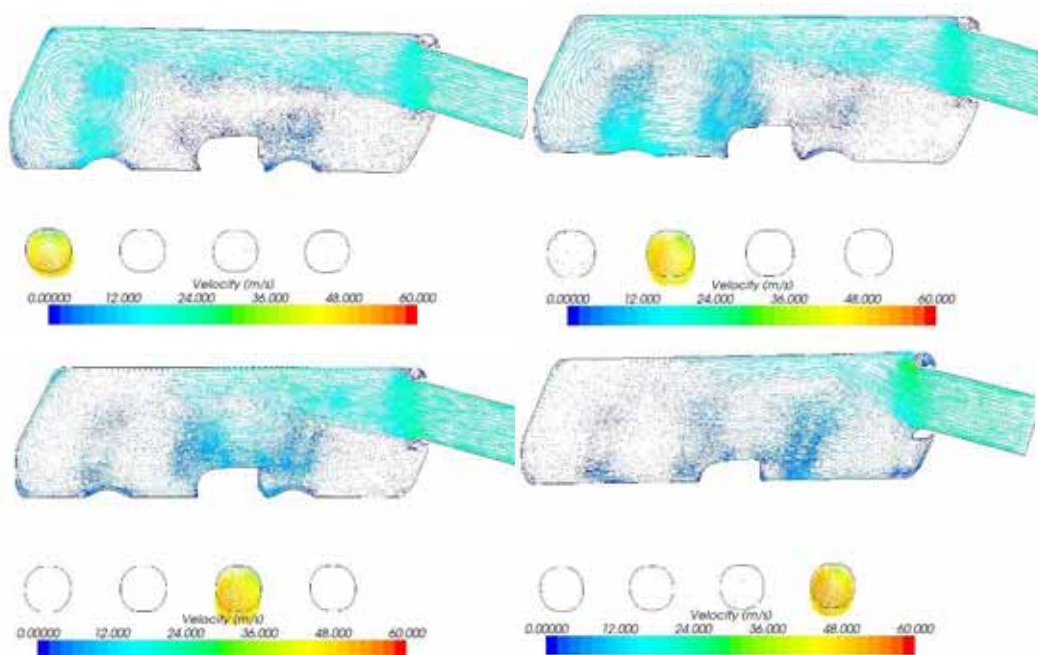


图 9 优化方案各歧管开启速度截面矢量图

我们在将来会用改进方案的试验结果校验其改善效果,进一步确认本文所述方法的正确性,作为我们公司的可靠有效的设计工具。

## 6 结论

- (1) 通过进气歧管稳流试验对进气歧管原方案的 CFD 计算模型进行试验数据对比验证,确保计算模型的准确性。
- (2) 通过分析原方案的进气歧管的压力场、速度场,得出不均匀度较大产生的原因,并针对此问题提出相应的优化建议,将歧管的进口轴线方向进行更改,保证其气流与稳压腔壁面产生相互作用,同时增大稳压腔与歧管连接处的过渡圆角,减小流动损失。
- (3) 通过采用相同的网格尺寸、边界设定,针对改进后的进气歧管进行 CFD 分析,分析歧管的压力场、速度场,得出进气歧管的最大不均匀度为 4.8%,处于合理范围内。
- (4) 通过 STAR-CCM+进行进气歧管的 CFD 计算能得到在试验台上无法得到的三维流场的详细信息,为进气歧管的开发提供一定的理论依据。在进气歧管的设计开发过程中,可通过模拟计算准确找到进气歧管的不合理部位,并迅速提出改进意见,从而减少试验数量,缩短开发周期。

## 7 参考文献

- [1] 黄征宏,邢渊.汽车进气管改型的数值模拟及优化设计[J].模具技术.2007.No.3:1-6.
- [2] 叶明辉,黄露,帅石金,王志,王建昕.汽油机进气系统的模拟计算与优化设计[C].2007 年 APC 联合学术年会论文.280-285.
- [3] 王晗,蔡忆昔,毛笑平.发动机进气系统不均匀性的三维数值模拟[J].小型内燃机与摩托车.2007,36 (3):41-44.
- [4] 罗马吉,陈国华,蒋炎坤,马元镐.进气管内三维稳态流动特性的数值分析[J].小型内燃机与摩托车.2001,30 (2): 1-4.
- [5] STAR-CCM+帮助文档