

分析进气歧管性能的三种方法的讨论

陶鸿莹

(泛亚汽车技术中心有限公司 上海 201201)

摘要：本文以某自然吸气汽油机的进气歧管为例，通过使用零维、准维和一维/三维（1D/3D）耦合计算等三种方法，讨论了不同方法在发动机性能预测方面的差异，以及它们模拟的歧管流动特性的精细程度。通过本文的研究，有助于工程师根据分析目标，选择正确的模拟分析模型，在保证适当的精度的条件下，减少工作量和计算周期。

关键字：进气歧管 零维 准维 耦合 性能

1 引言

随着发动机性能的日益提高，以及新材料、新工艺的应用，进气歧管的设计也日趋复杂。可变进气歧管长度、塑料进气歧管等的应用已经很常见。一个好的进气歧管需要均匀分配各缸的进气量；减少流动损失；充分利用谐振效应和减少流动的分离及漩涡^[1]。由于先进的进气歧管通常具有不规则的几何现状和可控的阀门，所以如何更加准确地模拟进气歧管的流动，以及正确地预测其对性能的影响，一直是很多工程师关心的问题。

在常见的热力学系统计算中，一般用零维模型或一维模型简化进气歧管，也有用准维模型提高空间离散程度的。进气歧管的 CFD（计算流体力学）分析通常的做法有稳态计算、孤立的瞬态计算和 CFD 与热力学系统的耦合计算（1D/3D 耦合计算）。工程师在研究进气歧管流动特性的时候，经常需要同时预测其对发动机整体性能的影响。本文选取了三种方法进行上述问题的研究：方法一，歧管容腔为零维的热力学系统模型；方法二，歧管容腔为准维的热力学系统模型；方法三，CFD（歧管）与热力学系统耦合模型。通过对比分析，希望为这几种方法的选择和使用提供一些指导意见。

2 三种分析方法的对比

本文研究的发动机是某型号的自然吸气汽油机，通过对进气歧管使用不同层次的空间离散方法（零维、准维和 1D/3D 耦合模型），得到了不同方法预测的发动机性能和流动特性，通过与实验结果的比较，分析了它们的预测精度，以及适用的场合。本文选取发动机的额定功率点作为工况点（6000rpm，全油门）。使用的热力学系统分析软件为 GT-Power，CFD 软件为 STAR-CD。

2.1 谐振腔零维模型

由于进气歧管的谐振腔容积比较大，可以考虑用容积模拟谐振腔的特性。根据谐振腔的结构特征，容腔被分割成了两个大小不一的容积（每个蓝色线条所围区域为一个容积），如图 1（左）所示。两个容积串联在一起，然后与歧管的其它部分相连接，如图 1

(中)所示。由于进气歧管的支管具有较明显的一维流动特征,所以可以使用 GT-Power 的一维管道模块来表示。如图 1(右)所示,谐振腔的平均压力只在两个容积之间有差异,容积内部是均匀的。这种方法基本没有考虑容腔内部的物理参数的差异,适用于流速较低、压力波动较小的场合^[2]。

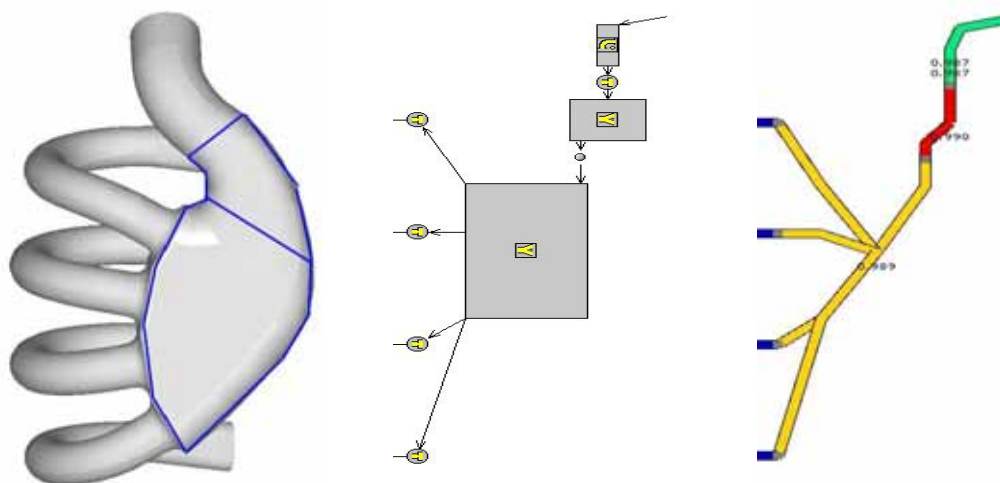


图 1 零维模型 (从左到右分别为歧管数模、GT-Power 模型和平均压力分布)

2.2 谐振腔准维模型

考虑到进气歧管容腔的形状不是很规则,在歧管不同位置的压力、温度、流速等流动参数也是不均匀的,为了进一步提高模拟精度,有必要考虑容腔空间的差异。

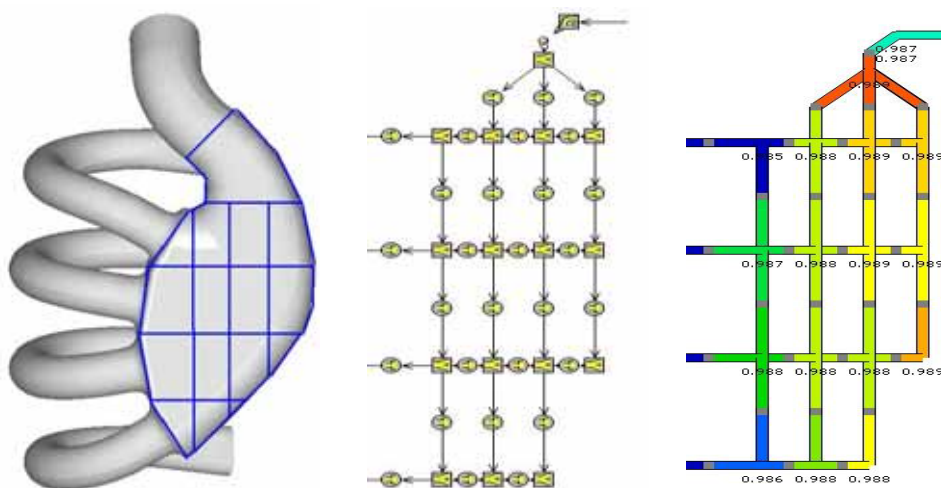


图 2 准维模型 (从左到右分别为歧管数模、GT-Power 模型和平均压力分布)

根据歧管谐振腔的扁平状结构特点,如图 2(左)所示,谐振腔被分割成了 16 个小容积。使用 UG 等 3D 制图软件测量每一个容积的体积,以及膨胀直径 (Expansion

Diameter) 和特征长度 (Characteristic Length), 得到了如图 2 (中) 所示的准维模型。进气歧管的支管使用一维管道模块模拟。由于每个小容积代表了一小块区域, 整个容腔拥有 16 个不同的状态点, 所以容腔的流动是准维的。即使流速较高、压力波动较大时也适用。如图 2 (右) 所示, 容腔的平均静压在不同位置具有明显的差异, 所以在一定程度上, 该模型反映了谐振腔形状对流动的影响。

2.3 进气歧管 1D/3D 耦合模型

为了准确预测歧管内部的流速、压力和温度的分布, 优化歧管的局部形状, 可以使用 CFD 软件进行分析。最常见的方法有进气歧管稳态流动计算, 或者孤立的瞬态计算。稳态流动计算具有较小的工作量和较短计算时间, 可以快速获得一些歧管流动特性。但是由于发动机的实际工作过程是瞬态的, 所以这种方法得到的流场与实际流场相差很大。孤立的瞬态计算首先从实验或一维热力学系统软件获得瞬态边界条件, 然后进行歧管内部的瞬态流动计算。与稳态流动相比, 这种方法更加接近真实的流动, 可以给工程师优化歧管提供更有价值的信息。但也存在明显的不足, 因为进气歧管与热力学系统的其它部分是独立求解的, 所以这两个部分的信息不能实时交换, 这导致整个系统的精度并没有得到提高。

这些年发展起来的 1D/3D 耦合计算的方法可以弥补上述两种方法的不足。本文使用 Pro-STAR/amm 划分网格, 进气歧管共有 2.5 万个多面体网格。五个流动边界设置为 Inlet, 并且与 GT-Power 耦合^[3]。如图 3 所示, 进气歧管 CFD 模型嵌在发动机热力学系统中。由于两者在计算过程中实时交换数据, 所以通常称之为 1D/3D 耦合计算模型。这种方法的主要优点有: 1) 提高了三维流动区域边界条件的准确度 (来自于热力学系统的计算); 2) 准确反映了进气歧管的设计对发动机性能的影响 3) 由于三维空间的离散有较明确的指标, 受用户经验的影响相对较小, 所以计算结果更加稳定可靠^[2]。

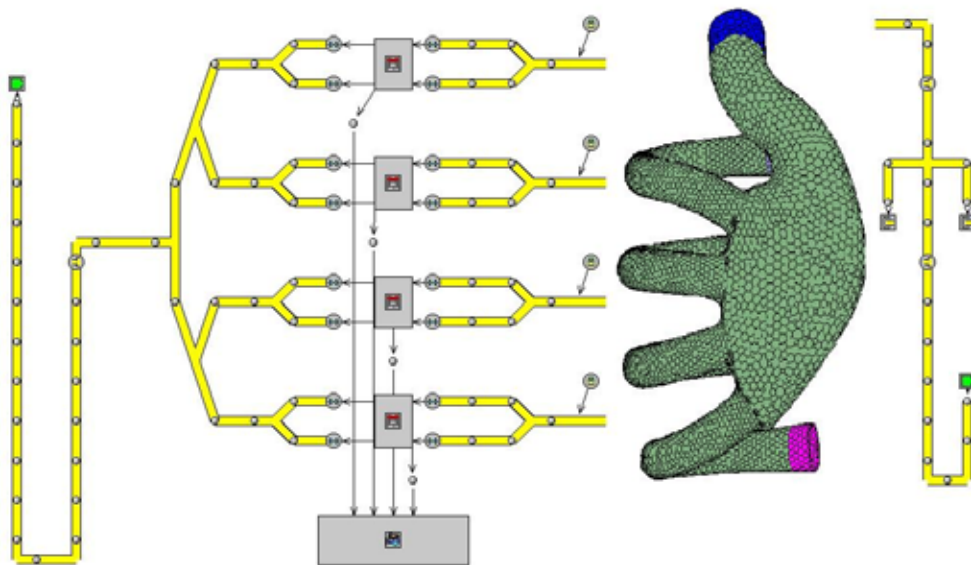


图 3 1D/3D 耦合模型（进气歧管为三维 CFD 模型，其余为一维热力学模型）

进气歧管的流体轨迹如图 4 所示，可以看到不同气缸的进气流体轨迹。在第一缸进气时，流体有一个大的拐弯，压力损失较大。在第二、三缸进气时，流体容易受到相邻进气支管的干扰。在第四缸进气时，流动比较顺畅，但是流程较长。

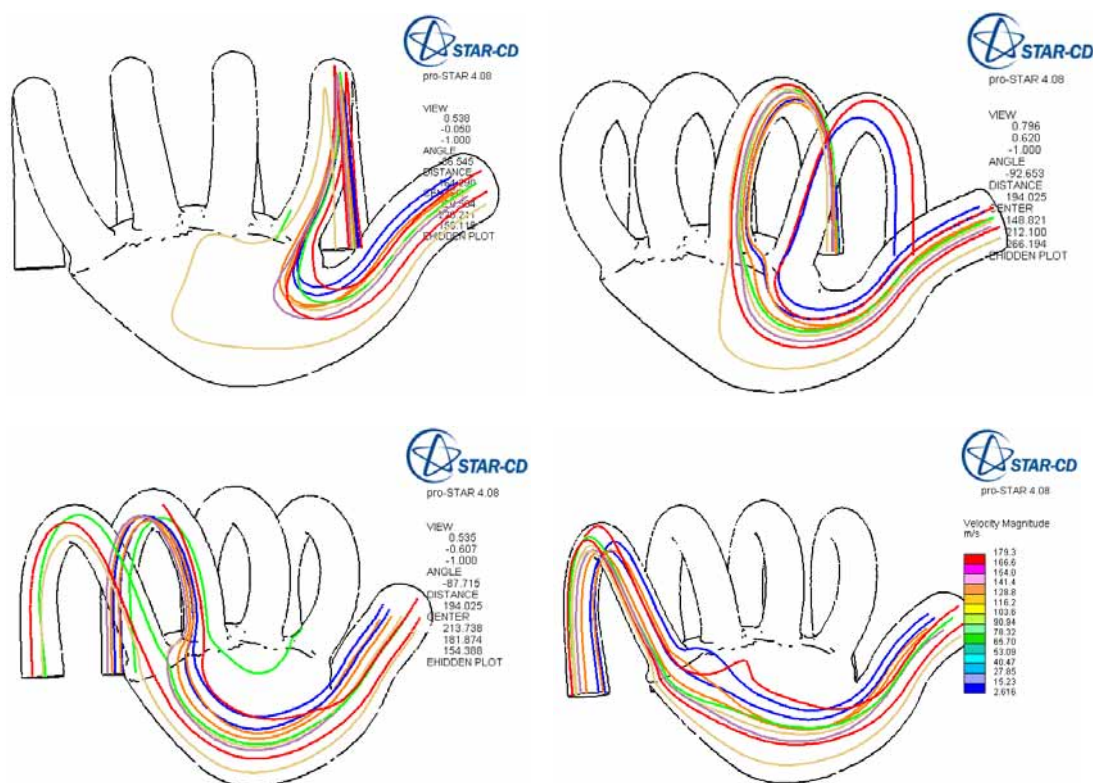
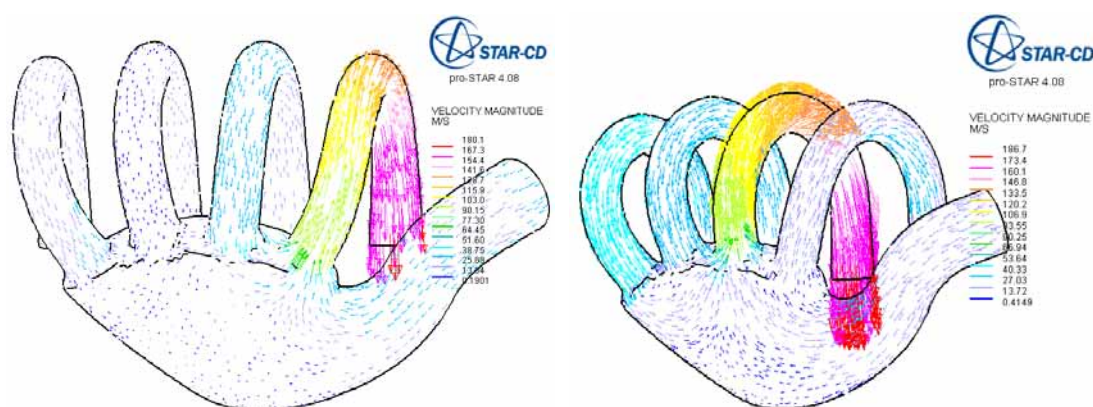


图 4 各缸最大进气流量时的流线图（各缸：左上#1，右上#2，左下#3，右下#4）

从图 5 可以看到歧管内部的流速分布，特别是分离、漩涡和碰撞等影响流动得区域，为优化进气歧管的设计提供了依据。



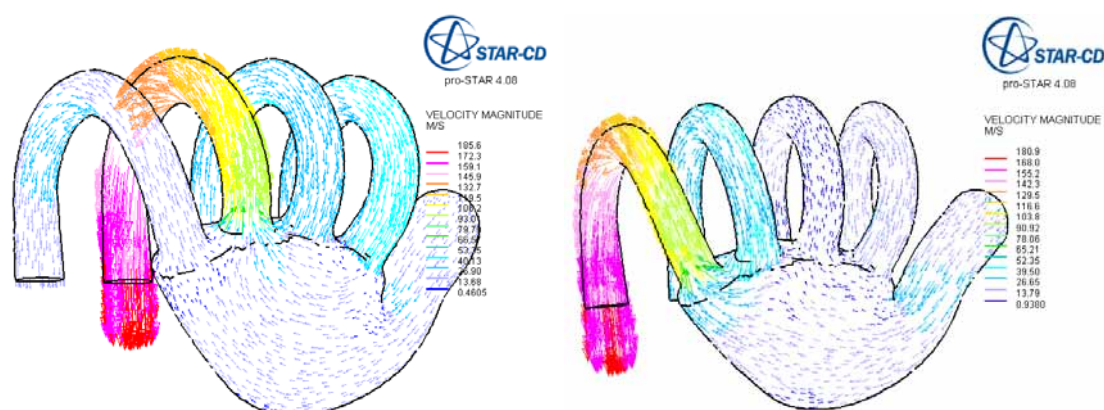


图 5 各缸进气流量最大时刻的速度矢量图（各缸：左上#1，右上#2，左下#3，右下#4）

2.4 三种模型的结果对比

表 1 对比了三种模型在性能预测方面的差异。从表 1 可以看出，三种模型的发动机功率和总的充气效率相差较小，而且与实验比较接近。但是预测的各缸充气效率略有差异，准维模型与 1D/3D 耦合模型较为接近。

表 1 发动机性能参数的对比

方法 性能	零维模型	准维模型	1D/3D 耦合模型	实验
功率 (kW)	74.7	74.5	73.8	74.4
扭矩 (Nm)	118.9	118.6	117.5	118.4
总流量系数 (%)	92.1	91.9	90.9	91.4
#1 缸 VE (%)	93.0	92.4	91.2	-
#2 缸 VE (%)	91.3	91.3	90.8	-
#3 缸 VE (%)	91.1	91.2	90.6	-
#4 缸 VE (%)	92.9	92.8	90.8	-

如果用户只关心发动机的功率和扭矩等宏观性能参数，使用零维或准维模型都是可行的，而且建模和计算的工作量都较小，需要输入的信息也较少。但是，如果用户需要预测进气歧管的详细三维流动特征，各缸进气均匀性/EGR 分配均匀性等问题，那么使用 1D/3D 耦合模型是非常有效的。

图 6 是进气歧管第四缸出口处的瞬态压力曲线。可以看到准维模型更加靠近 1D/3D 耦合模型的计算结果，这说明空间的离散程度对压力的波动有一定的影响，在压力波动较大时，推荐使用准维模型或者 1D/3D 耦合模型。

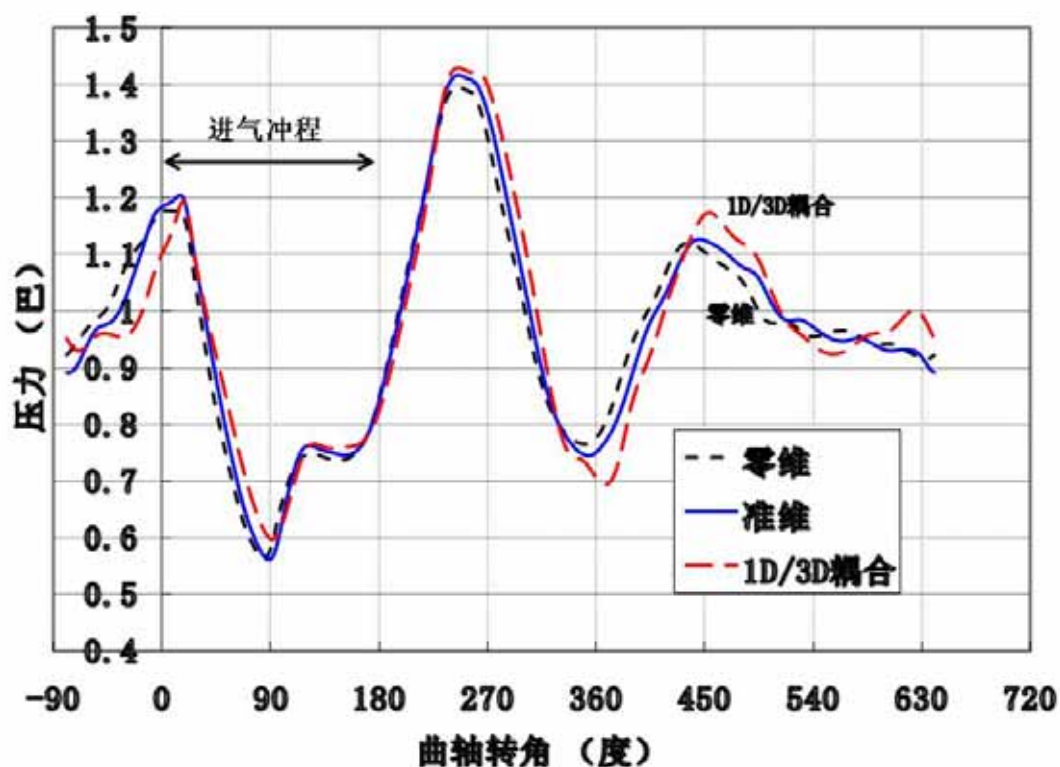


图 6 进气歧管第四缸出口位置压力

3 结论

通过本文的研究,可以说明零维、准维和 1D/3D 耦合模型等三种方法都可以较为准确地预测发动机的功率和扭矩等宏观性能,1D/3D 耦合计算有助于更加深入地了解局部三维流动、各缸进气均匀性和压力波动等特性,而且在技术上是完全可行的。

工程师在设计进气歧管时,选择正确的模拟分析模型,可以在保证合理精度的条件下,减少工作量和计算周期。

参考文献：

- [1]. M. Safari, M. Ghamari & A. Nasiritosi, *Intake Manifold Optimization by Using 3-D CFD Analysis*, SAE Paper 2003-32-0073/20034373
- [2]. AVL, *1D-3D Coupling Simulation*, 2008
- [3]. Gamma Technologies, *CFD Coupling Tutorials*, 2006