

基于 STAR CCM+的 3D-CAD参数化设计功能对排气系统 进行优化

Exhaust System Optimization and Parametric Design Based on STAR CCM+ 3D-CAD

吴春玲 牟江峰 刘双喜 陈皓 王远

中国汽车技术研究中心 天津 300162

摘要： 在排气系统的热端设计过程中，在满足机舱和底盘布置的情况下，排气压力损失和催化器端面流动的均匀性是设计主要的关注点。本文通过应用 STAR CCM+的 3D-CAD几何建模功能模块，在设计过程中将某汽油机排气系统中的催化器扩张管和收缩管锥度、催化剂载体直径和长度、连接管段直径等关键尺寸参数化，并建立了流体动力学模型。通过对其进行三维稳态流动数值模拟，发现扩张管的形状会对气流在管壁出现分离和漩涡产生影响，直接通过调整设计参数对 3D几何模型进行修改，降低了排气压力损失和流动不均匀度，实现设计的优化。本流程实现了 CAD和 CFD工作过程的集成，缩短了设计和优化时间。

关键词： 排气系统，参数化设计，STAR CCM+

Abstract With meeting the demand of under hood arrangement and chassis layout, pressure loss and the velocity distribution uniformity in the substrate is the keystone in exhaust system design. In this paper, radian and conical degree of diffuser, diameter and length of substrate, and other dimensions of automotive exhaust system were parametric designed with 3D-CAD modeling based on STAR CCM+. The mathematical model of flows in the substrate was established, and three-dimensional numerical simulations of the steady flows in the exhaust system with different diffuser configurations were performed. The results show that irrational diffuser can cause the flow separate from the wall and produce stronger turbulent. The optimal design was achieved by direct modifying the 3D model design parameters, the exhaust system pressure loss and flow uniformity was decreased. This method integrates CAD and CFD procedures, it cut down workload and increase efficiency.

Key words: Exhaust System, Parametric Design, STAR CCM+

1 引言

排气系统是汽车发动机的重要部件之一，其内部流通特性的好坏将直接影响发动机的动力性、经济性和排放性^[1]。催化转换器是降低汽油机有害排放的有效装置，其内部复杂的流动、传热是影响

其催化效率的重要因素。催化器形状结构对性能的影响主要表现在对流动分布和压力损失的影响，催化器入口管和扩张管设计不合理会产生涡流和气流分离现象^[2]，造成催化剂载体前端面流动的不均匀性，既会引起流动阻力的增加，又会造成温度分布的不均匀。流速和温度过高的区域使催化剂快速老化，容易造成载体损坏、堵塞，这样发动机背压过高，直接导致发动机功率下降；流速和温度过低的区域催化剂又得不到充分利用，使总体催化效率降低^[3]。而且，温度分布的不均匀性造成载体径向温度梯度增大，容易产生热应力从而造成载体热变形和损坏。因此，催化器的 CFD 流动分析成为其开发的重要内容之一。

在传统的设计过程中，先通过三维几何造型软件如 CATIA和 Pro/E等做初步几何建模，再抽取内部流体区域进行 CFD分析，根据分析结果提出修改意见，最后又回到三维 CAD软件中修改，然后进行下一轮 CFD分析优化，如此反复循环直至得到满意结果。而本文通过 STAR-CCM#中 3D-CAD功能进行参数化几何建模，可以将关键设计量值（如长宽高、角度、直径等）参数化，CFD分析和优化过程中，仅对设计参数进行重新输入，便可以完成几何模型的修改，直接进行网格的重新自动生成，便可以进行下一轮分析计算。本文所述设计和分析流程能在同一软件中实现，避免了不同软件间模型和数据来回传导，减少了重复工作量，提高了工作效率。

2 数值模型

2.1 建立参数化几何模型和网格划分

整个排气系统的设计要根据发动机的位置和机舱、底盘空间布置要求，确定管路基本的走向和位置，确保不与其它部件发生干涉，同时也要考虑安装的方便。图 1 为 3D-CAD 建模过程中绘制的催化器草图（催化器扩张收缩口可锥形，也可为喇叭口型），先将固定点定于原点，并添加参考线，通过线条之间的平行和垂直关系进行相对定位，在草图中，将催化器的扩张和收缩管的锥度、催化剂载体的直径和长度、入口、出口和中间连接管段的直径定义为设计参数，便于优化过程中修改。图 2 为排气系统热端的参数化三维 CAD模型，包含排气入口、前级催化器、连接管段、后级催化器和排气出口。各关键设计尺寸已经参数化。

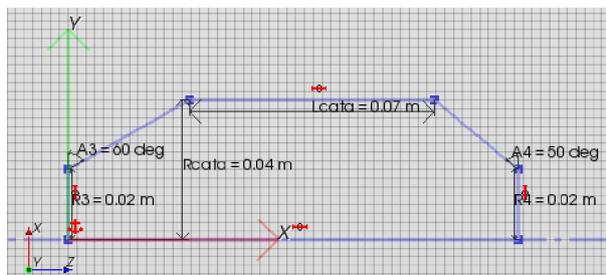


图 1 催化器部分 3D-CAD 参数化建模草图



图 2 排气系统热端的参数化三维 CAD模型

采用切割体网格 (Trimmed mesh) 对排气系统进行网格划分，主要由六面体网格构成，在保证计算精度的同时节约计算时间，为防止计算过程中回流的出现，对入口和出口进行拉伸 (extrude)，

最终生成共约 45 万网格，可以消除模型计算的网格依赖性^[4]。

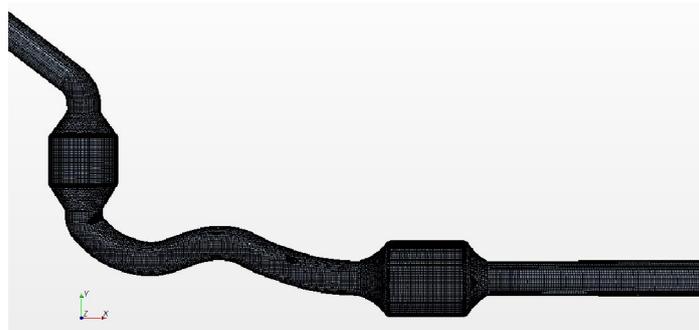


图 3 网格划分

2.2 边界条件和相关设置

入口边界条件设置为流量入口，气体流量为估算值 0.11kg/s，将入口气流设定为均匀分布的、且沿入口轴线方向流动。经过前期的模拟试算表明，在较低压力状况下，出口压力的设置对排气系统的压力损失没有影响，对流出出口区域采用压力边界的形式，压力设置为 2.5kPa。排气在管道中使用湍流，k-e 使用湍流模型，稳态不可压缩流体计算^[5]。

将催化剂载体可以视作大量微小管束的集合，视为多孔介质区域^[6]（按照多孔介质层流处理，其细小的孔道水力直径约为 0.001m，而流速约为 10m/s，雷诺数小于 2000）。设置 interface 连接多孔介质和前后流体区域。尾气在催化剂载体内流动是沿其孔道径向方向，因此，整体式蜂窝催化剂载体按各向同性多孔介质处理，即流体流经载体时只有沿轴向方向的速度和压力损失。

2.3 试验数据的获取

本模型中的两个关键数据粘性阻力系数（Porous Viscous Resistance）和惯性阻力系数（Porous Inertial Resistance）通过试验获取。对于多孔介质，在 STAR-CCM+ 中按照如下公式进行设置^[7]：

$$\frac{\Delta p}{L} = -(P_i |v| + P_v)v \quad (\text{式 1})$$

其中：L 为多孔介质区域的长度，v 为通过介质的流速，m/s，P_i 和 P_v 为分别多孔介质的惯性阻力系数和粘性阻力系数。在多孔介质的模拟计算时采用的速度为表观速度（superficial velocity），可以由体积流量和催化剂的截面积推算，三效催化器载体的阻力特性由台架试验确定，在不同排气流量下，测量催化剂载体前后压差。

拟合速度和单位长度压降，由下图 4 知二者呈线性关系，得到单位长度压降与速度的关系为 y=1967x 和 y=1376x，线性相关度分别为 0.997 和 0.998，满足拟合要求。对比式 1 可以得到前后级的粘性阻力系数分别为 P_{v1}=1967 后 P_{v2}=1376，惯性阻力项为零，流体为层流流动，与前面的分析判断一致。

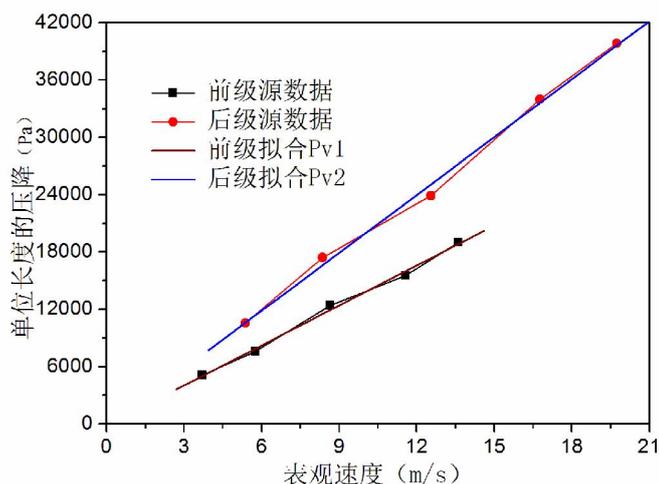


图 4 拟合不同速度时单位长度压力损失关系式

3 仿真结果与分

3.1 不均匀度指数的定义

气流在载体截面上的流动均匀性决定了气体在催化剂载体中的停留时间，从而影响催化剂的催化效率，关系到发动机的排放性。同时，流动均匀能有效减少压力损失。为便于定量比较，引入催化剂载体截面上流体速度不均匀度指数 D 来评价在催化器界面上流动的均匀程度^[1]，其定义为：

$$D = \left(\int_{A_0} \frac{|U - U_{avg}|}{U_{avg}} dA \right) / A_0 \quad (\text{式 } 2)$$

其中， A_0 为截面积， U_{avg} 为截面平均速度， U 为某网格单元速度大小， D 越小，表示流动越均匀， D 越大，流动分布越不均匀。此处是在催化剂载体入口端 1cm 处做横切面，通过 Field Function 自定义函数计算。

3.2 初始设计方案

对初始设计方案中，排气管中各段压力损失进行对比，发现排气连接管段所占压力损失最大，达到 49.8%，一方面是由于管路弯折次数较多，弯折角度较大，另一方面可能是管路过小。

表 1 设计 1 排气管中各段压力损失

	前级催化剂载体	连接管路	后级催化剂载体	总压损
压力损失 (kPa)	8.1	13.4	5.4	26.9
各段压损占比%	30.1	49.8	20.1	

从产品实际应用出发，一般来说管路基本走向和弯折都是由机舱和底盘的空间布置决定的，改动空间不大，因此，可以通过增加管径来减小压力损失。另外，前级催化器因受制于发动机排气歧管，其改动较困难，因此，将重点放在优化后级催化器上。

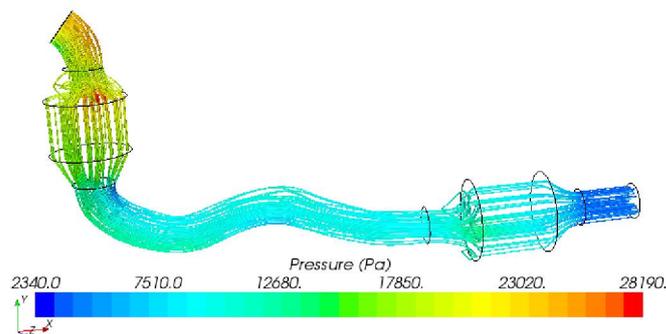


图 5 排气管内流动迹线图

根据上面的分析，先将连接管直径参数从 22.5mm 增加至 25mm，将催化剂直径和长度设为定值，催化器的入口扩张管和出口收缩管有锥角型和喇叭口型，对锥角型而言，因为连接管段和催化剂直径已经确定，故通过控制草图中锥角参数，便可以调节其基本形状；对喇叭口型，可以通过确定其圆弧半径（或曲率）来定义其形状。给出初步的设计参数：锥角 45° （设计 1），圆弧半径 8mm（设计 2）。仿真结果如下：

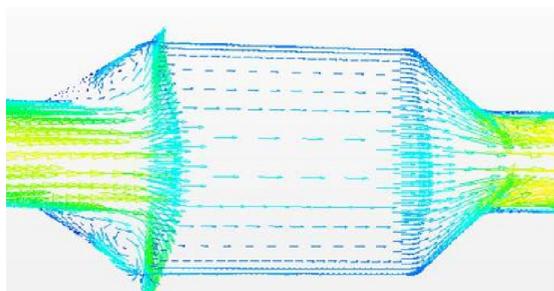


图 6 设计 1 后级催化器截面速度矢量图

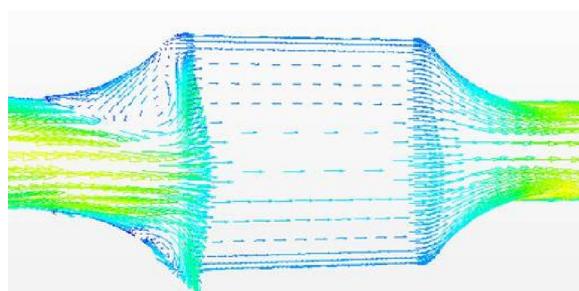


图 7 设计 2 后级催化器截面速度矢量图

由上面图 6 和图 7 速度矢量可以清楚的看出，在后级催化器入口扩张管段壁面附近气流出现了分离，并产生较强的漩涡。漩涡一方面造成气流的局部压力损失，另一方面会造成催化剂端面流动分布不均，对催化器的转化效率和使用寿命有不利影响。

从图 8 和图 9 的催化器横截面上压力云图可以看出，中间部位压力明显高于四周，与速度云图中中部速度较快是一致的，这是因为入口管开口位于中部。对比两张压力云图会发现图 8 的压力较小区分布在四周，而图 9 主要在上部，还呈现压力“盆地”，这与图 7 的速度矢量图中较强流动漩涡对应，为避免这一点，应减小扩张管圆弧半径。

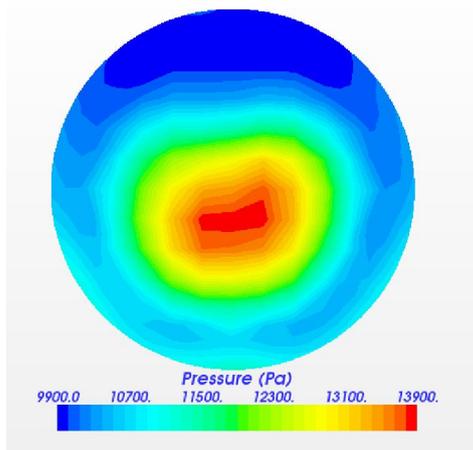


图 8 圆弧半径 5mm 时后级催化剂横截面压力云图

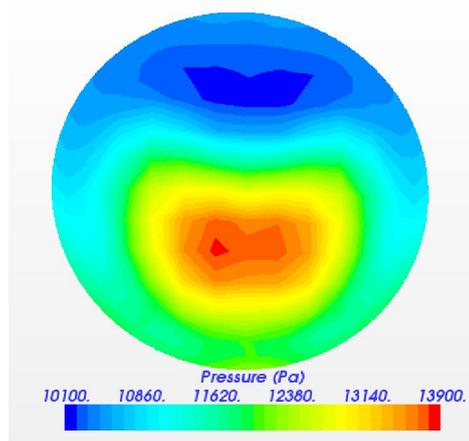


图 9 锥角为 30° 时的后级催化剂横截面压力云图

3.3 优化设计方案

通过对初始设计方案的分析,直接修改后级催化器设计参数,减小锥角至 35° (设计 3),减小圆弧半径至 5mm (设计 4),更新三维模型并重新自动生成网格,再次计算,得到后级催化器截面的速度矢量图(见图 9 和图 10),并比较不同设计方案下的不均匀度和系统总背压(见表 2)。

通过图 9 和图 6 的对比,发现减小锥角能有效抑制扩张管壁面流动的分流和漩涡的产生,图 10 和图 7 的对比,发现扩张管上部较强的回流漩涡已经基本消失,截面上速度分布更加均匀,不均匀度由 0.42 下降到 0.27,总背压也从 21.5kPa 下降到 19.2kPa,流动得到明显改善。综合起来看,在增大连接管管径后,设计 4 的方案优化其它三种方案。

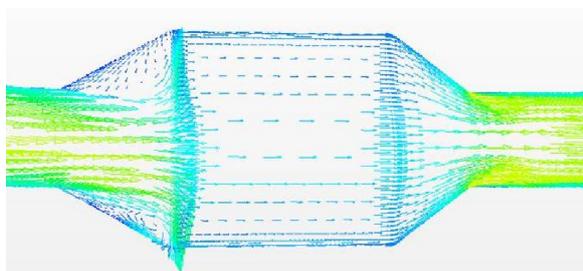


图 9 设计 3 后级催化器截面速度矢量图

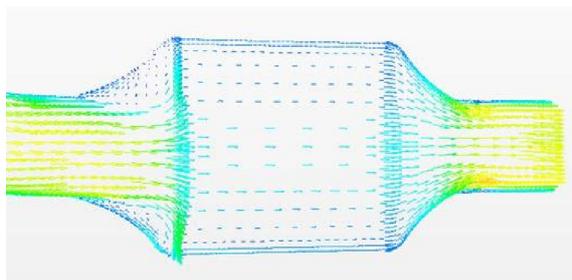


图 10 设计 4 后级催化器截面速度矢量图

表 2 不同设计参数时计算得到的总背压和后级催化器不均匀度对比

方案	参数	不均匀度	总压损
锥角型 R1(设计 1)	45° 锥角	0.39	20.8
锥角型 R2(设计 3)	30° 锥角	0.34	20.1
喇叭口型 R1(设计 2)	半径 8mm 曲率	0.42	21.5
喇叭口型 R2(设计 4)	半径 5mm 曲率	0.27	19.2

4 结论

利用 STAR-CCM+的 3D-CAD 功能,实现了对排气系统前后级催化器和连接管的参数化建模,并对其进行 CFD 分析,找出初步设计中的不足,通过对模型参数的修改,实现了对设计的优化,总背压从 26.9kPa 下降到 19.2kPa,后级催化器流动均匀性也明显改善,取得了满意的效果。将三维建模、网格划分、CFD 分析、模型修改等流程集成于一体,减少了大量的重复工作,提高了设计的质量和效率。

5 参考文献

- [1] 龚金科,周立迎等,三效催化器转换器压力损失对发动机性能的影响,汽车工程,2006,26(4),413-416.
- [2] 帅石金,王建昕,庄人隽,CFD在车用催化转化器结构优化设计中的应用,汽车工程,2000,22(2).
- [3] Jinke Gong,Longyu Cai,Weiling Peng,et al Analysis to the Impact of Monolith Geometric Parameters on Emission Conversion Performance Based on an Improved Three-Way Catalytic Converter Simulation Model, SAE Paper 2006-32-0089
- [4] 陈玲玲,刘卫国,六面体网格下复杂型转化器的三维数值模拟,车用发动机,2007,167(1),61-64
- [5] 王福军.《计算流体动力学分析》北京:清华大学出版社,2004
- [6] Xiaogang zhang,Martin Romzek,Computational Fluid Dynamics (CFD) Applications in Vehicle Exhaust System, SAE Paper, 2008-01-0612
- [7] STAR-CCM+ User's Guide. CD-adapco Inc., 2008