

上海市船舶与海洋工程学会 2020 年学术年会轮机专场论文专栏

基于 CFD 模拟的某低速柴油机排气集管结构优化设计

丁立志, 宋雅丽, 李 磊, 王雁冰

(中船动力研究院有限公司, 上海 200129)

摘 要: 为判断某低速柴油机排气集管设计的合理性, 对该排气集管的内部流场进行了 CFD 分析。分析表明: 原始排气集管结构设计存在问题。对此进行了优化改进。优化前后的 CFD 对比分析表明: 优化后排气集管内部流道得到改善, 内截面速度均匀性提高, 压力损失减小, 排气集管整体性能得到明显提高。

关键词: 柴油机; 排气集管; 结构; CFD 分析

中图分类号: TK 423.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)03-0023-04

Structure Optimization Design of Exhaust Manifold of a Low Speed Diesel Engine Based on CFD Simulation

Ding Lizhi, Song Yali, Li Lei, Wang Yanbing

(China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: In order to judge the rationality of the exhaust manifold design of a low-speed diesel engine, the internal flow field of the exhaust manifold was analyzed by CFD. The analysis showed that there were some problems in the structure design of the original exhaust pipe, so it was optimized and improved. The CFD comparative analysis before and after optimization shows that the internal flow channel of the exhaust manifold and the velocity uniformity of the internal flow channel are improved, the pressure loss is reduced, and the overall performance of the exhaust manifold is significantly improved.

Key words: diesel engine; exhaust manifold; structure; CFD analysis

0 引言

排气集管是柴油机排气系统的重要组成部分, 柴油机运行过程中, 高温高压废气经排气阀进入排气集管。排气集管的结构直接影响排气损失等参数, 进而影响柴油机动力性和经济性。本文采用 CFD 数值模拟方法, 对某低速柴油机排气集管内部流场进行三维仿真模拟; 根据获得的速度场和压力场等信息, 判断排气集管设计的合理性, 并提出优化方案。为二冲程低速柴油机排气集管的优化设计提供理论依据。

1 CFD 求解模型和边界条件设置

1.1 计算域模型建立

采用三维建模软件建立几何模型, 并抽取内部腔体为计算流体域, 导入流体计算软件; 通过流体计算软件自带的多面体网格生成器进行网格划分。网格基本尺寸设为 30 mm, 为保证计算精度, 最小相对尺寸设为 6 mm, 边界层 3 层, 厚度为 3 mm。

1.2 基本假设和 CFD 模型选择

在本研究中, 以空气替代柴油机废气, 大排内介质均为均一理想气体。所有外部表面采用无滑移边界, 假设边界层绝热。CFD 模型选择为湍流, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 基于 AMG 梯度求解器求解; 能

量计算采用 Segregated Fluid Temperature 能量模型；近壁面采用 Two-Layer All y^+ Wall Treatment 处理。

1.3 边界条件设置

选取气缸排气阀出口为入口边界，设置为流量入口；大排渐缩管出口为出口边界，设置为压力出口，对排气集管分别进行 ISO 条件下 100 % 负荷工况的稳态和瞬态计算。稳态计算的主要目的是确定瞬态计算的初始条件值。每个入口质量均设为 3.609 kg/s，出口压力设为 0.388 MPa；假设边界层绝热，因此入口温度和出口温度均设置为 432 °C。经计算，得到瞬态计算的初始条件如表 1。

表 1 瞬态计算初始条件

进口压力（表压）/MPa	0.393
进口速度/（ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）	34.8
进口温度/°C	431
出口温度/°C	431

瞬态计算考虑一个周期内各缸的点火顺序和点火间隔角，基于 GT-Power 计算得到的一个循环内的瞬态质量流量和压力作为边界。将发动机转速（105 r/min）转换为以秒计，定义以秒为单位的循环周期，则一个循环需要 0.572 s，共计算 2 个循环，整个模拟时间设置为 1.15 s。每个循环内的质量流量和压力随时间变化的曲线如图 1 所示。

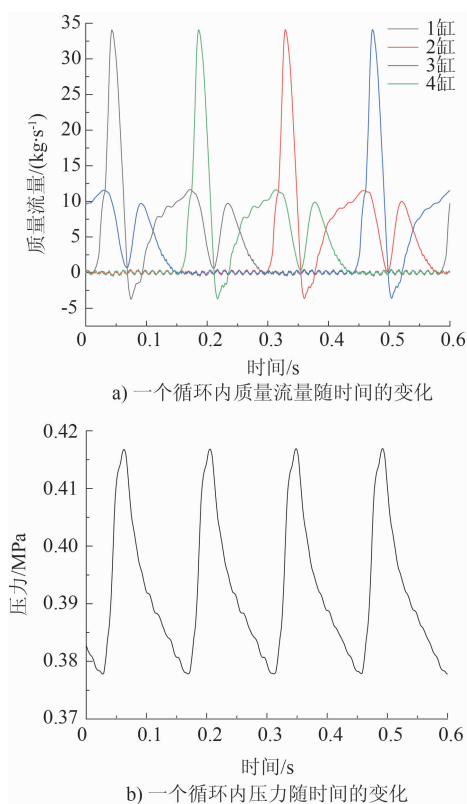


图 1 瞬态计算边界条件曲线

2 排气集管初始方案及 CFD 分析

2.1 初始设计方案

排气集管初始设计方案的流体域模型见图 2a)。模型包括从排气阀出口到排气集管出口渐缩管的整个流体域。为了利于计算收敛和观察渐缩管出口处的流场变化情况，将出口边界沿法线方向向外延长 500 mm 直管段。完成的网格模型如图 2b) 所示，网格总数 711 534。

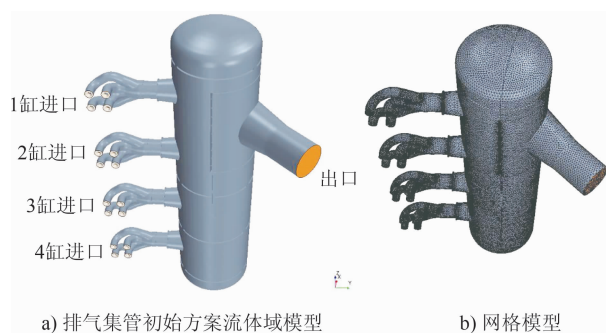


图 2 排气集管初始设计方案模型

2.2 初始方案 CFD 分析

计算结果的残差和监测出口压力曲线如图 3 所示。可以看到：残差在最初计算时间步内便下降收敛，计算稳定后，每个时间步内残差下降数值虽然没有达到 3 个数量级，但出口压力监测曲线呈现规律性周期变化，说明计算收敛。补充说明：网格已通过无关性验证。

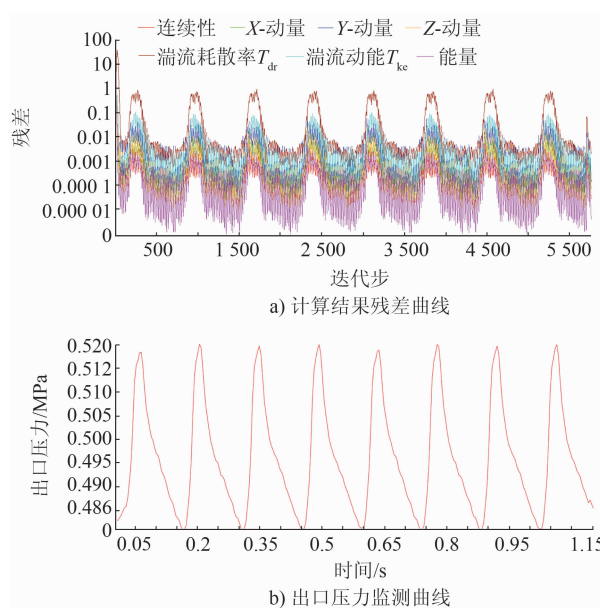


图 3 计算结果残差曲线和出口压力监测曲线

排气集管各缸内部横截面速度场分布如图 4 所示。在排气阀-膨胀节-大排进口扩散管的连接处存在明显的几何台阶。从第 3 缸的流动情况可以看

出：因为膨胀节内径较小，流道在此处收窄，当气流量较大时，流动加速，导致气流喷射进大排管，并且在台阶处形成一个小的再循环区。同时，膨胀节和扩散管连接处法兰和台阶的存在，导致了整个扩散管流道内靠近边界层处形成一个显著分离区，这种现象在扩散管底部尤为明显，从而，对扩散管性能产生负面影响。从大排出口渐缩管横截面的速度场可以直观看渐缩管内流场情况：气体从大排主管进入渐缩管后，因为流动方向的突然变化，形成一个小的分离区，但对渐缩管内整体流场影响不大。总体来说，出口渐缩管内部流动良好。

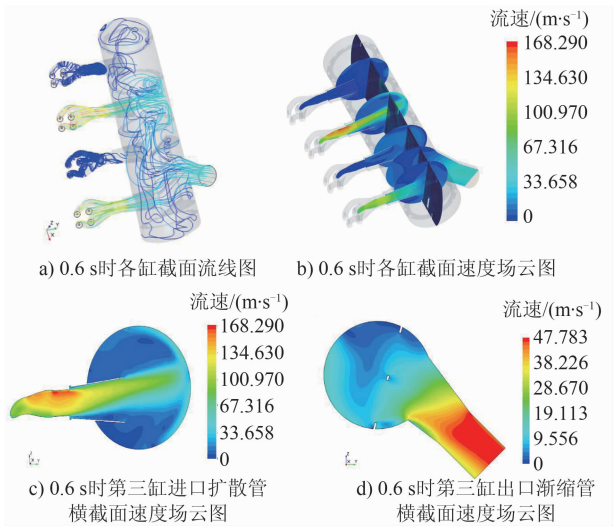


图4 0.6 s 时各缸截面速度场云图和流线图

3 排气集管结构优化

3.1 优化设计方案

根据前面的分析，原始排气集管设计的主要问题在进口处：膨胀节和扩散管之间连接法兰及直径差形成台阶，对气流产生很大影响，形成气流再循环区，造成不必要的压力损失，是影响大排性能的主要因素。优化方案为：将原设计中的膨胀节修改为同心异径膨胀节，以保证膨胀节和排气阀、扩散管之间的平滑连接，消除此处流道的台阶，以优化流道，减小甚至消除气流再循环区。

为进一步提高排气系统效率，将大排进口渐扩管的扩张角由 13°减小到 8°，以改善进口边界层处流体和壁面分离现象。修改后的膨胀节和扩散管截面尺寸见图 5。

基于优化设计后的模型抽取流体域，并进行网格划分。网格划分采用和原始设计相同的网格参数设置，网格总数为 687 083，如图 6 所示。

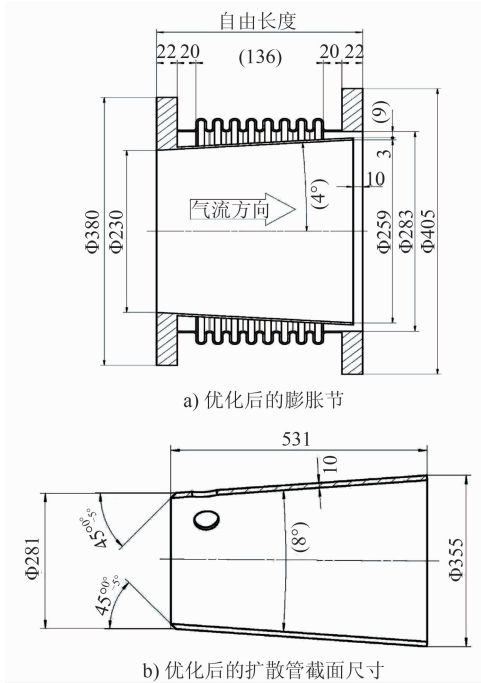


图5 优化设计后的膨胀节和扩散管截面图

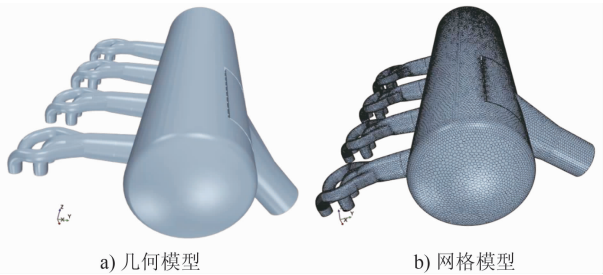


图6 优化后排气集管流体域几何和网格模型

3.2 优化前后的 CFD 对比验证

优化前后排气集管进口速度场如图 7 所示。从图中可以明显看出：设计优化后扩散管顶部再循环区域明显减小，底部边界层分离问题基本消失。此外，沿扩散管横截面形成了更加均匀的流场，相同位置截面速度均匀性由 0.76 提高至 0.93。

表 2 为优化设计前后的数据对比。可以看出：优化设计后出口质量流量增加了 1.3 %，这意味着进入增压器涡轮进口的废气质量流量增加了 1.3 %，排气流动条件得到明显改善。同时，进出口压损从 3.33×10^4 Pa 降至 2.49×10^4 Pa，大大减少了不必要的压力损失。

表2 优化设计前后数据对比

参数	原始设计	优化设计
出口质量流量/ (kg · s ⁻¹)	1.586 485e + 01	1.605 968e + 01
进出口压损/Pa	3.334 877e + 04	2.494 136e + 04

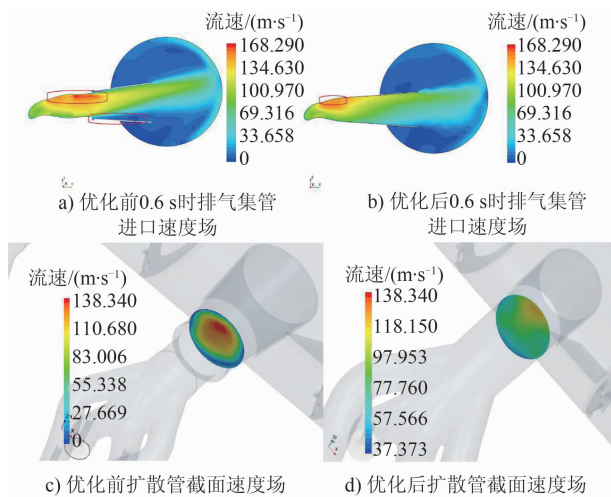


图 7 设计优化前后排气集管进口速度场对比

以上验证表明：大排进口流道形状和扩散管的设计对排气集管的性能有至关重要的影响；结合

(上接第 9 页)

由表 10 可知：进出港航行时间为 1.5 h 时，油耗和排放降低率最大；随着进出港航行时间的减少，降低率随之下降。其中，方案 5 进出港航行时间为 1.5 h 的减排效果最明显。方案 2 的初投资最少，回报时间最短。方案 3、方案 4 和方案 5 的初投资各不相同，随着进出港航行时间的增加，初投资相应增加；但回报时间方案 5 相对较短，其中又以进出港航行时间为 1.5 h 时的回报时间最短。

4 结语

通过上述对各推进方案在不同主航行时间和进出港航行时间的表现分析，可以总结出以下几点。

(1) 受电池容量的限制，目前的电池技术尚不适用于给长途远洋航行货船提供动力，只能在船舶

CFD 分析进行的优化设计使排气集管性能得到大幅提高。

4 结论

本文基于 CFD 分析，发现原始排气集管设计存在不足，对此进行优化设计。优化后的排气集管进口截面速度均匀性从 0.76 提升至 0.93，出口质量流量增加 1.3%，压力损失减小 8 400 Pa。排气集管性能得到明显提高。

将 CFD 模拟计算技术应用于柴油机排气集管设计，能够可视化分析气流在管道内部的流动情况，可在很大程度上为排气系统的优化设计提供理论指导，大大缩短设计开发周期，提高研发的成功率。

进出港航行时替代主机给船舶提供推进动力；

(2) 短途航行船舶采用电池技术提供推进动力，其减排收益、回报时间等效果明显；

(3) 采用电池技术提供推进动力，航行时间越长，其减排收益、回报时间等效果越明显；

(4) 虽然采用电池技术在减排方面可以收到较大收益，但就目前而言比较经济的方式是：在已装备 PTO 的船上增加 PTI 功能（即方案 2），其投资回报效果最佳，同时还能获得较好的减排收益。

参考文献

- [1] 随丛标. 现有电池技术不适用于货船的减排需求 [J]. 船舶推进与辅助机械, 2019 (8/9): 50-53.