

Fluent 在小型增压汽油机排气歧管设计中的应用

Application of Fluent in Design of Exhaust Manifold for Small Turbocharged Gasoline Engine

钱丁超

(中国第一汽车股份有限公司研发总院)

摘 要: 针对某 0.6L 涡轮增压汽油机设计了两种排气歧管方案, 通过 Fluent 软件对两设计方案进行计算仿真, 分析其流场分布特性, 并结合台架试验评价其实际使用效果。仿真结果与试验结果表明: 等长式排气歧管的流场分布特性更有利于降低排气阻力、提高充气效率; 更有利于提高涡轮增压器的工作效率, 提高发动机的动力性。

关键词: 涡轮增压汽油机, 排气歧管设计, Fluent, 台架试验

Abstract: Two exhaust manifold designs for a 0.6L Turbocharged Gasoline Engine were analyzed, using Fluent to study the flow field distribution characteristics and bench test to evaluate the actual use effect. The simulation studies and the bench test results show that the equal length exhaust manifold has a better flow distribution characteristics to reduce exhaust resistance and improve volumetric efficiency, and works more conducive to improve turbocharger efficiency and engine power.

Key words: Turbocharged Gasoline Engine, Design of Exhaust Manifold, Fluent, Bench Test

1. 前言

排气歧管是发动机排气系统的重要组成部分, 其设计直接影响发动机的动力性与经济性。在设计过程中通常以排气歧管各歧管流量的均匀性以及流场的流通性来评价设计方案是否合理。各歧管流量的均匀性会影响到氧传感器对排气中氧离子浓度的检测精度, 从而影响混合气浓度的测量^[1]。也会造成各缸排气背压不均匀, 影响涡轮增压发动机涡轮入口气压的稳定性, 从而导致发动机的循环变动。而流场的流通性会影响发动机的充气效率, 过大的排气阻力会造成泵气损失, 降低发动机的工作效率^[2]。同时, 排气歧管内部气流漩涡较小, 气流噪声也较小^[3]。对于涡轮增压发动机, 排气歧管直接影响增压器对排气能量的利用效率, 在设计中希望出口保持较高的流速, 以确保涡轮增压器的响应速度。因此, 结合涡轮增压系统的要求来进行排气歧管的设计对于优化发动机的工作过程具有实际的工程意义。

本文以某 0.6L 涡轮增压汽油机为研究对象, 设计了两种不同形式的排气歧管, 使用 Fluent 软件对排气歧管的内部流场进行仿真, 从而分析其流通特性, 并且通过台架试验研究两种设计方案对发动机实际工作性能的影响。

2. 排气歧管物理模型

根据涡轮增压发动机对排气歧管在流量均匀性、流通性、出口流速等方面的要求, 本文提出了两种排气歧管设计方案。方案 1 为等长式排气歧管, 即排气歧管各缸歧管的进口至出口的长度相等,

如图 1 所示。方案 2 为非等长式排气歧管，如图 2 所示。两种设计方案的进口直径均为 29mm，出口直径均为 26mm。

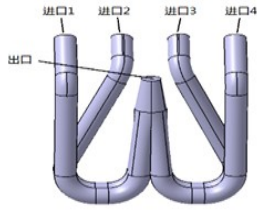


图 1 方案 1 等长式排气歧管

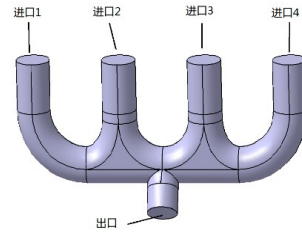


图 2 方案 2 非等长式排气歧管

3. 排气歧管的 CFD 流场分析

3.1 CFD 数值计算思路

为了建立便于数值计算的 CFD 模型，对排气歧管内实际的气体流动过程进行了必要的简化和假设，归纳起来有：

- 1) 本文通过稳态工况的模拟计算来分析排气歧管的流通性，因此排气歧管内的气体流动可以视为定常流动，以空气为工质，并视为理想气体。
- 2) 忽略排气歧管管壁与空气间的传热损失，假设排气歧管管壁为处处等温的绝热表面。

通过发动机的 GT-Power 建模仿真，可以得到发动机全负荷下排气歧管进出口的压力、温度等边界条件。为了使两种排气歧管设计方案的计算结果具有可比性，两种方案采用相同的边界条件。在分析排气歧管流量均匀性时进出口均采用压力边界，并给定温度；分析流场流通性等其他因素时进口采用质量流量边界，出口采用压力边界，边界条件设定的具体数值如表 1 所示。由于两种排气歧管为轴对称结构，只需分别计算分析以进口 1 和进口 2 为入口的情况。

表 1 边界条件的设置

发动机转速 / (r/min)	进口			出口	
	进口压力 / kPa	进口温度/ K	进口流量/ (kg/s)	出口压力 / kPa	出口温度/ K
3000	106	959	0.0119	105	734
5000	138	1010	0.0385	132	801
7000	159	1120	0.0513	150	829
9000	214	1190	0.0783	198	868
11000	226	1240	0.0809	208	870

3.2 CFD 计算结果及分析

排气歧管的流动均匀性可以通过相同边界条件下各歧管流量的最大不均匀度来衡量^[2]。由于两种排气歧管为对称结构，最大不均匀度的计算方法为：

$$\text{最大不均匀度} = \frac{|\text{进口1质量流量} - \text{进口2质量流量}|}{\text{平均质量流量}}$$

各发动机转速下两种方案的最大不均匀度如表 2 所示。从计算结果可以看出, 在各个发动机转速下等长式排气歧管的最大不均匀度均在 1%以内, 大大低于非等长式排气歧管, 因此其流动均匀性明显优于非等长式排气歧管。

表 2 排气最大不均匀度

	发动机转速 (r/min)				
	3000	5000	7000	9000	11000
方案 1 最大不均匀度 (%)	0.84	0.61	0.49	0.49	0.76
方案 2 最大不均匀度 (%)	0.49	5.73	7.05	6.53	7.00

当排气歧管设计不合理导致流通性欠佳时, 会增大排气阻力, 导致排气背压升高, 不利于气缸内废气的排出。本文以相同进口流量、相同出口压力的边界条件下, 各缸歧管排气背压的大小来分析两种排设计方案流通性的优劣。图 3 和图 4 分别对比了一缸歧管和二缸歧管的排气背压。从图 3、图 4 可见, 随着发动机转速的升高, 排气背压也呈升高趋势, 方案 1 在各个工况点下的排气背压均高于方案 2。由于管路长度造成较大的沿程损失, 以及较多弯头造成的局部损失, 导致方案 1 的排气阻力更大, 流通性较方案 2 稍差。

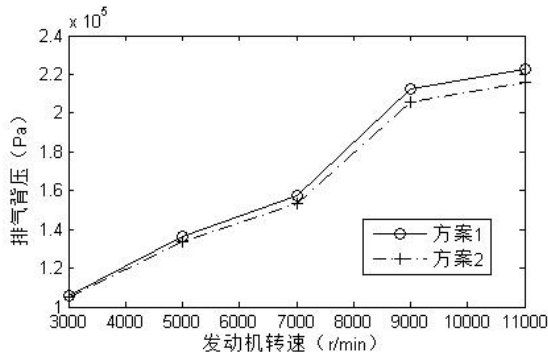


图 3 一缸歧管排气背压对比

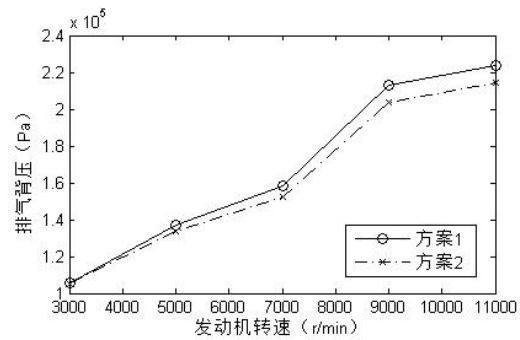
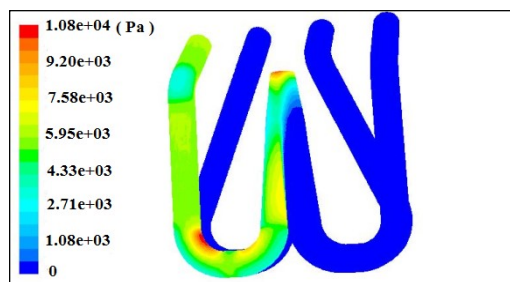


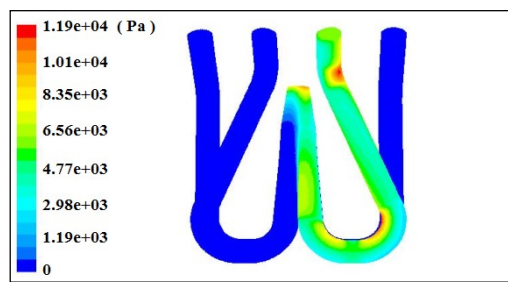
图 4 二缸歧管排气背压对比

3.3 各缸歧管压力波干涉的分析

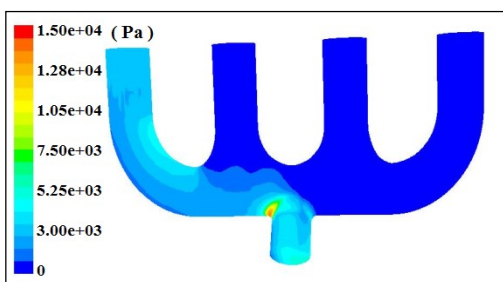
对于高转速发动机来说, 排气歧管内压力波的互相干涉是一个很重要的考虑因素, 会影响发动机的充气效率。车用增压发动机一般选择最大转速 50~60%的全负荷工况作为匹配工况点^[4], 因此本文以 $n=7000\text{r/min}$ 的全负荷工况点为例, 在进口为流量边界、出口为压力边界的前提下, 分析了两种方案的压力场与速度场。由图 5 和图 6 可见, 在方案 2 中仅一缸歧管打开时, 一缸内气流对三缸、四缸有一定的干扰, 而仅二缸歧管打开时, 对三缸、四缸的干扰非常明显。



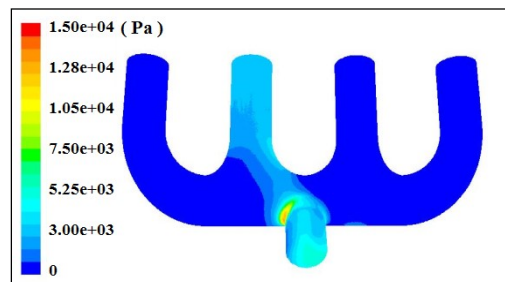
a 方案 1 仅一缸歧管打开



b 方案 1 仅二缸歧管打开

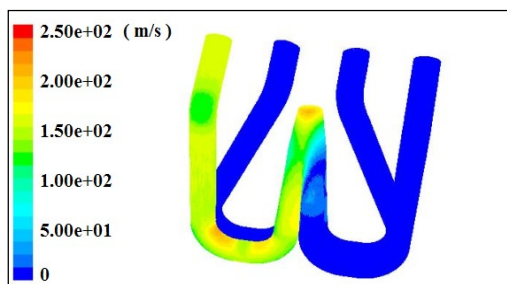


c 方案 2 仅一缸歧管打开

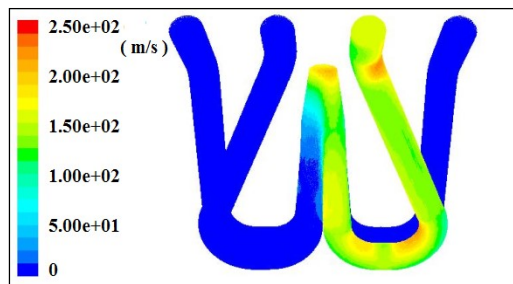


d 方案 2 仅二缸歧管打开

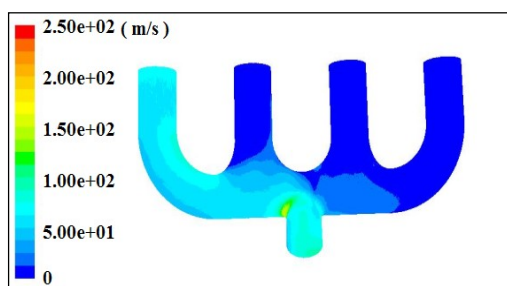
图 5 各方案动压云图对比



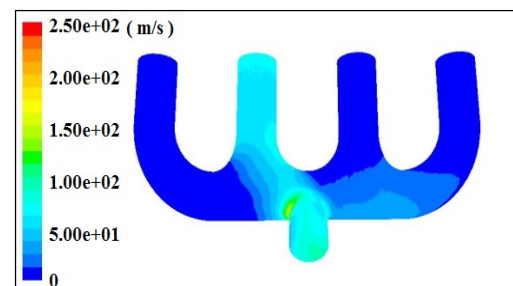
a 方案 1 仅一缸歧管打开



b 方案 1 仅二缸歧管打开



c 方案 2 仅一缸歧管打开



d 方案 2 仅二缸歧管打开

图 6 各方案速度云图对比

4. 台架试验结果及分析

为了结合 CFD 仿真结果来评价设计方案的优劣, 本文对两种排气歧管进行了台架试验研究, 表 3 为此款涡轮增压汽油机的基本参数。

表 3 发动机基本参数

进气形式	涡轮增压
气缸排列及缸数	直列 4 缸
缸径×冲程 (mm×mm)	67.0 × 42.5
排量 (mL)	599
压缩比	12
供油形式	多点电喷

台架试验时为了确保两种设计方案的可比性, 采用单一变量法, 以不同的排气歧管设计方案为单一变量, 确保其他各项试验条件相同。

对于该发动机, 以最佳动力性为其首要的优化目标。由于外特性反应了发动机所能达到的最高动力性能, 本文以发动机外特性来评价排气歧管对动力性的影响。图 7 对比了两种设计方案的充气效率, 方案 1 在全负荷时各转速下的充气效率均明显高于方案 2。结合仿真结果分析原因, 虽然方案 1 的排气背压略高, 但其流动均匀性更好, 各缸排气干扰更小, 从而降低排气阻力, 提高了充气效率。由图 8 可见, 采用方案 1 时发动机的转矩特性更好, 不仅在各转速下转矩均更大, 而且扭矩平台的覆盖范围更大。结合仿真结果分析其原因, 较高的出口流速以及良好的排气均匀性保证了涡轮增压器工作效率更高, 加之较高的充气效率, 使其转矩特性更为优良。

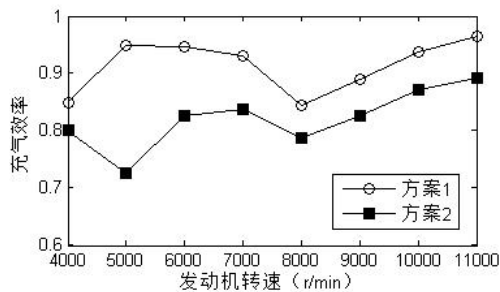


图 7 两种方案的发动机充气效率曲线

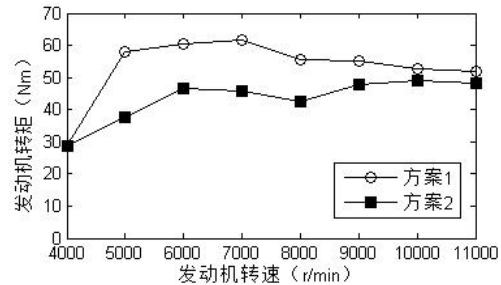


图 8 两种方案的发动机外特性曲线

5. 结论

本文通过 CFD 仿真研究以及台架试验结果, 发现等长式排气歧管在流动均匀性以及流场分布特性上的优点使其更有利于涡轮增压器的工作, 并且在降低排气阻力、提高充气效率方面效果明显, 从而使本文研究的增压发动机具备更好的动力性。此外, Fluent 的仿真结果能较好地支持台架试验结果, 说明 CFD 计算可以用于评价和指导排气歧管的设计。

6. 参考文献

- [1] 黄泽好, 张浩亮, 孙章栋, 董腾鲜. 某发动机排气歧管流场分析与结构优化[J]. 西南大学学报

- (自然科学版), 2011, 33 (1): 153—157
- [2] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 黄键, 林晓辉, 严世榕. 基于 FLUENT 的柴油机排气歧管内流场的数值模拟[J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2010, 38 (1): 80—85
- [4] 陆家祥. 柴油机涡轮增压技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.