

# 基于网格变形技术的某柴油机进气道优化

## A Diesel Engine Intake Port Optimization Based on Mesh Deformation Technology

伊士旺<sup>[1,2]</sup>, 赵铮<sup>[1,2]</sup>, 刘亚奇<sup>[1,2]</sup>, 孙科<sup>[1,2]</sup>, 李春芳<sup>[1,2]</sup>

(1. 长城汽车股份有限公司技术中心, 河北保定市 071000

2. 河北省汽车工程技术研究中心, 河北保定市 071000)

**摘要:** 进气系统是发动机的重要组成部分, 影响着发动机的动力性、经济性及排放性能。本文以某柴油机进气道为例, 基于 MeshWorks 网格变形技术和 modeFRONTIER 优化集成功能, 实现对不同升程状态下气道自动优化。通过结果分析, 不仅可以找出最优解, 还可以得到设计变量和结果之间的相关性。

**关键词:** 气道; 网格变形; 优化; CFD; MeshWorks; modeFRONTIER

**Abstract:** Air intake system is an important part of the engine, affects the engine power, economy and emission performance. Based on the intake port of a diesel engine as an example, this paper based on mesh deformation technology of MeshWorks and optimization integration capabilities of modeFRONTIER, realize intake port automatic optimization under different valve lift states. Through the analysis of results, not only can find the optimal solution, but also a correlation was obtained between the design variables and the results.

**Key words:** Intake Port; Mesh Deformation; Optimization; CFD; MeshWorks; modeFRONTIER

### 1 前言

气道设计的优劣显著影响着缸内气体的流动和燃烧状况, 从而很大程度影响着发动机的动力性、经济性和排放特性。随着计算流体力学 CFD 发展的成熟, 对发动机进气道定量分析计算能力越来越强, 不仅可以计算出气道的流量系数和滚(涡)流比, 而且通过进气道的压力、速度等三维流场分布可以对气道形状进行改进。但是, 传统的 CFD 优化是在上一轮计算结果的基础上提出改进建议和方向, 然后通过更改 CAD 模型再次进行 CFD 计算, 直至得到满意的结果为止。这种方法效率低、重复工作量大, 且难以协调多目标之间的关系。

本文以某柴油机进气道为例, 基于 MeshWorks 网格变形技术和 modeFRONTIER 优化集成功能, 实现对不同升程状态下气道自动优化。通过结果分析, 不仅可以找出最优解, 还可以得到设计变量和结果之间的相关性, 可为其他机型设计提供理论依据。

## 2 气道评价方法

进气道试验评价的方法有很多种,目前以 Ricardo、AVL 和 FEV 三家内燃机研究机构的评价方法最为常用。我公司采用的是天津大学根据 Ricardo 气道试验原理制成的试验台,故本文在此只介绍 Ricardo 气道评价方法。

Ricardo 气道评价方法是对进气道在稳态状况下的流量系数和涡流比进行评价,保持气道进、出口在一定压差的情况下,通过调节气门升程后得到每个状态下的流量系数和涡流比,最后积分得到平均流量系数和平均涡流比。所以,Ricardo 气道评价方法不但考虑了气道本身的特性、气缸直径,还考虑了气门的开启规律。

流量系数表征了进气道的流通能力,Ricardo 流量系数公式如下:

$$C_F = \frac{Q}{AV_0}$$

式中, $Q$ 为试验测得的实际空气流量; $A$ 为气门座内截面面积, $A = \frac{\pi d_v^2 n}{4}$ , $d_v$ 为气门座内径, $n$ 为进气门数目; $V_0$ 为理论进气速度, $V_0 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$ , $\Delta p$ 为进气道压力降, $\rho$ 为气门座处气体的密度。

平均流量系数  $C_{Fm}$  为

$$C_{Fm} = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F d\alpha$$

式中, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 分别为相应于进气门开、关的曲轴转角。

涡流是在发动机进气过程中形成的一种宏观大尺度涡流,涡流的旋转轴与气缸轴线平行。Ricardo 涡流比计算公式:

$$N_R = \frac{8M}{QDV_0}$$

式中, $M$ 为涡流计测得的 1.75D 面上的角动量; $D$ 为气缸直径。

平均涡流比  $R_s$  为

$$R_s = L_D \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F N_R d\alpha}{\left(\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F d\alpha\right)^2}$$

式中, $L_D = \frac{DS}{nd_v^2}$ 为发动机形状因子。

### 3 模型建立

#### 3.1 CFD 模型

在气道进口建立一个稳压腔用来代替外部的大气环境。CFD 模型使用 STAR-CCM+ 建立，以多面体网格为主，壁面有两层边界层。湍流模型采用  $k-\epsilon$  标准湍流模型，气体密度设置为恒定值，计算过程不考虑传热。在缸筒 1.75 倍缸径 ( $D$ ) 处建立面，用来输出该升程下此面上的角动量。进出口采用压力边界条件，压差与气道稳流试验一致（气门升程  $\leq 3\text{mm}$  时进出口压差为  $5000\text{Pa}$ ，气门升程  $> 3\text{mm}$  时进出口压差为  $3500\text{Pa}$ ）。CFD 模型如图 1 所示。

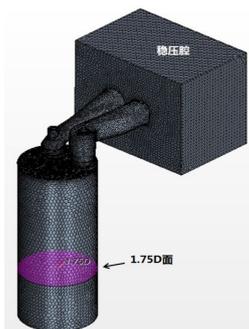


图 1 气道 CFD 模型

#### 3.2 MeshWorks 网格变形

MeshWorks 是由 DEPUSA 公司开发的一款工程应用软件，主要服务于模型的外形灵活变形，以快速得到符合工程设计的需要的模型外形。它不仅提供了自由变形、控制体变形、平滑变形等技术，还可以进行参数化，具有使用 Batch 方式进行批量变形的良好特点。

影响气道性能的形状参数很多，其中包括气道入口位置、喉口截面大小、蜗壳形状及凸台（螺旋室）高度等。结合本机型，同时考虑网格变形实现难易程度，本文只将喉口截面大小定义为设计变量。在流量系数降低较小的情况下，为得到较高的涡流比，本次优化定义变量方向为减小喉口截面面积。定义切向气道喉口截面变形量为  $T$ ，螺旋为  $H$ ，设计变量如图 2 示意。

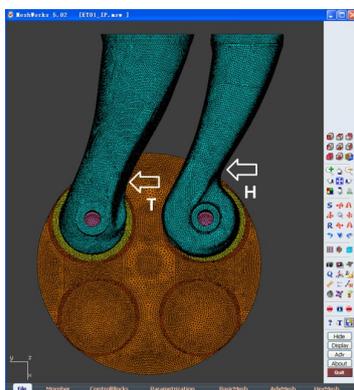


图 2 网格变形设计变量

#### 3.3 modeFRONTIER 优化模型

modeFRONTIER 软件是一个完整的、多目标优化设计分析开发平台，能够集成并自动化用户的多

学科仿真分析流程，实现设计-修改-再分析自动化，能应用现代设计方法（包括试验设计 DOE、多目标优化 OPT、敏感度分析 Main Effect、响应面建模 RSM 等）实现综合优化和自动化分析。

通过优化软件 modeFRONTIER 将 STAR-CCM+和 MeshWorks 集成，完成流程中的数据传递及逻辑传递。优化过程中 STAR-CCM+和 MeshWorks 用脚本文件调用，实现后台运行。MeshWorks 得到变形参数后对气道面网格进行变形，之后保存成 STAR-CCM+能识别的面网格格式。STAR-CCM+通过脚本宏文件自动导入面网格，划分体网格，建立 1.75D 面，设定边界条件及物理模型，后处理自动定义相关方程计算流量系数和涡流比，并将结果以文件输出。

本文前期优化策略采用多岛遗传算法，但结果稳健性不好，后期使用 DOE 全因子算法，结合气道铸造精度，定义设计变量步长为 0.2mm，变量限值为 2mm，共 121 个算例。本次优化基于 4mm、7mm 气门升程。

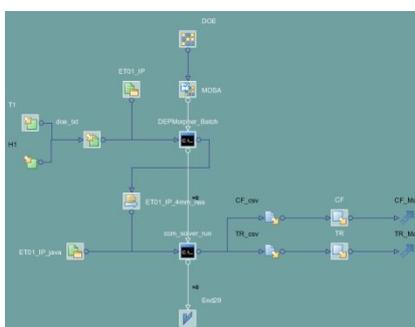


图 3 优化模型

## 4 优化结果

4mm、7mm 气门升程优化结果如下气泡图所示，横坐标是流量系数，纵坐标是涡流比，气泡大小代表螺旋变量 H，气泡颜色代表切向变量 T。

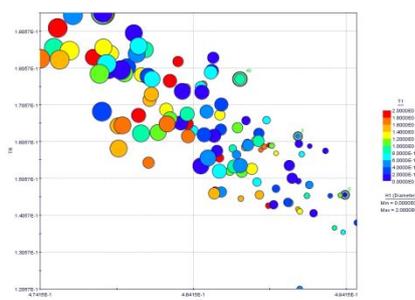


图 4 优化结果（4mm 气门升程）

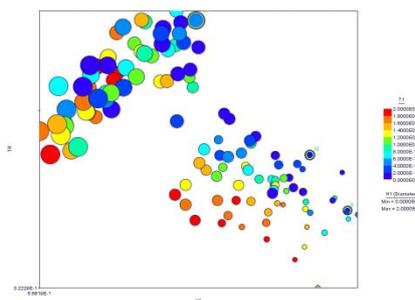


图 5 优化结果（7mm 气门升程）

以上两图中用黑色圆圈标识为较优结果，绿色数字为算例编号，其中包括原始点，记为 0#。4mm 升程选出 3 个较优点，分别为 3#、49#和 110#；7mm 升程选出 2 个较优点，分别为 12#和 69#。下面对选出的较优点进行完整气门升程计算，得到平均流量系数和平均涡流比。优化结果对比如图 6 所示，数据分析对比如表 1 所示。

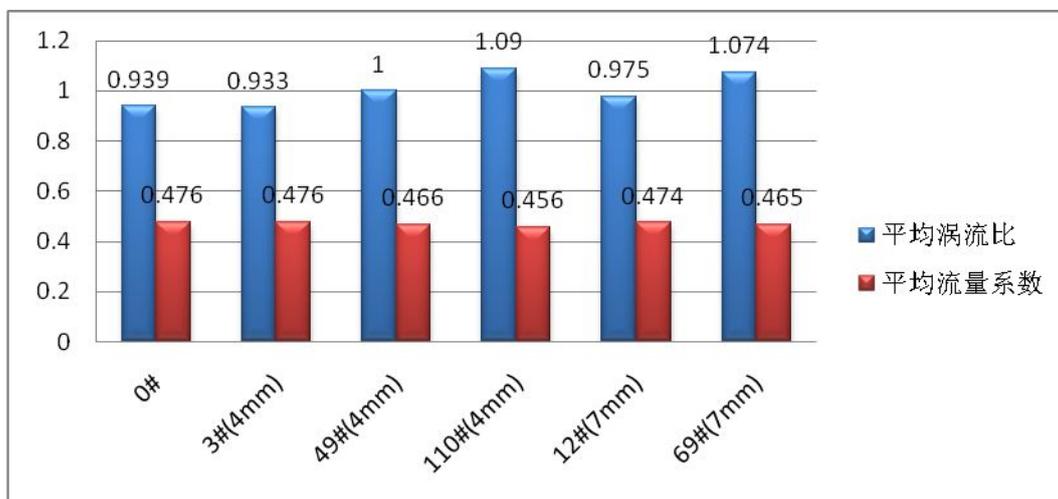


图 6 优化结果对比

表 1 优化结果数据分析

	切向变量 T (mm)	螺旋变量 H (mm)	流量系数 变化	涡流比 变化
0#	0	0	--	--
3# (4mm)	0.6	0	0	-0.64%
49# (4mm)	1	0.8	-2.10%	6.50%
110# (4mm)	0	2	-4.20%	16.08%
12# (7mm)	0.2	0.2	-0.42%	3.83%
69# (7mm)	0.6	1.2	-2.31%	14.38%

由表 1 可以看出，当切向变量  $T=0.6\text{mm}$ ，螺旋变量  $H=1.2\text{mm}$  时，涡流比有 14.38% 的提升，同时流量系数降低 2.31%；当切向变量  $T=0\text{mm}$ ，螺旋变量  $H=2\text{mm}$  时，涡流比有 16.08% 的提升，但是流量系数相比降低较大，为 4.20%。

优化分析还可以得到设计变量和目标之间的相关性。如下图所以，颜色越深相关性系数绝对值越大，红色代表正相关，蓝色代表负相关。两图整体上可以看出，螺旋变量  $H$  与流量系数和涡流比的相关性要远大于切向变量  $T$ 。同时，螺旋变量  $H$  体现出与流量系数成负相关性，与涡流比成正相关性，这与本次优化的初衷相符；但是，切向变量在 4mm 气门升程时体现出与涡流比成甚微的正相关性，在 7mm 气门升程时则变成了负相关性。可见，针对本气道，减小螺旋气道的喉口截面面积对气道性能参数更为敏感。

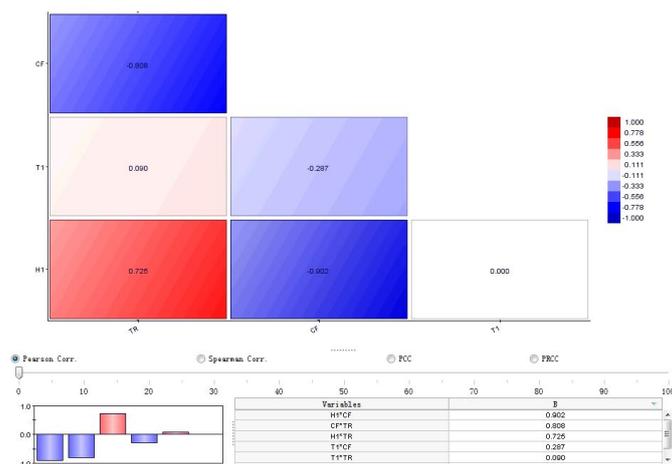


图 7 设计变量与目标之间的相关性 (4mm 气门升程)

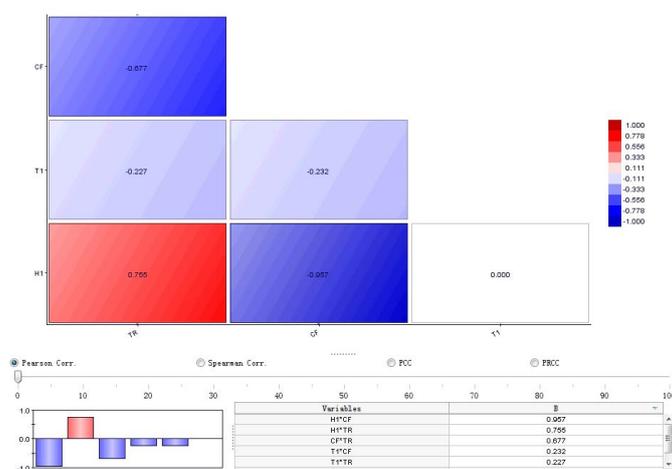


图 8 设计变量与目标之间的相关性 (7mm 气门升程)

## 5 总结

通过网格变形优化方式,可节省 CAD 模型修改及网格重新划分步骤,大大减少人工工时。通过集成优化技术可以实现仿真流程的自动化,同时运用优化策略,找到满足设计要求的目标,并找出各设计变量与目标值的相关性,可为其他机型设计提供理论依据。

## 6 参考文献

- [1] 周龙保编 《内燃机学》 [M] 机械工业出版社 2005
- [2] Claudia O. Iyer and Jianwen Yi 《3D CFD Upfront Optimization of the In-Cylinder Flow of the 3.5L V6 EcoBoost Engine》 [J] SAE 2009-01-1492
- [3] MeshWorks User Guide [M]
- [4] modeFRONTIER User Guide [M]