

基于面心组合的排气歧管响应曲面优化设计*

OPTIMIZATION DESIGN OF EXHAUST MANIFOLD BASED ON FACE-TO-HEART COMBINATION OF RESPONSE SURFACE METHOD

刘伟** 张勇*** 程天才 王海燕

(东北石油大学 黑龙江省石油石化多相介质处理及污染防治重点实验室, 大庆 163318)

LIU Wei ZHANG Yong CHENG TianCai WANG HaiYan

(Heilongjiang Key Laboratory of Petroleum and Petrochemical Multiphase Treatment and Pollution Prevention, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

摘要 为解决发动机排气歧管结构优化通常采用单因素控制变量法或正交试验法带来的参数交互作用不显著等局限问题,采用中心复合试验设计(Central Composite Design)方法中的面心组合法构建响应曲面优化。以某重型载货汽车的发动机排气歧管为研究对象,实现了排气歧管 38 组结构参数的快速匹配,建立了多项式数学模型,得出了响应目标回归方程,拟合出了排气歧管最佳的结构参数及对应的流动均匀指数,并运用数值模拟方法对响应曲面优化的结果进行了验证。结果表明:当四支管组合排气时,基于面心组合试验设计下的排气歧管经过响应曲面方法优化出最优结构的流体流动均匀指数由原来的 0.76 提升到 0.82,比初始结构升高了 6 个百分点。

关键词 排气歧管 面心组合设计 响应曲面优化 回归方程 流动均匀指数

中图分类号 U463

Abstract In order to solve the limitations caused by the engine exhaust manifold structure optimization which usually adopts single factor control variable method or orthogonal test leading to the insignificant parameter interaction, the face centered combination method in the central composite design is used to respond to surface optimization, taking the engine exhaust manifold of a heavy chemical vehicle as the research object, the exhaust 38 groups of manifold structural parameters finish the fast matching, the mathematical model is established and polynomial response regression equation is concluded, fitting out of the exhaust manifold optimum structural parameters and corresponding flow uniformity index, additionally, the results of response surface optimization is verified by the numerical simulation. The results show that when the four branches are combined, the optimal structure fluid flow uniformity index of the exhaust manifold by the response surface method based on the face centered combination way is improved from the original 0.76 to 0.82, which is 6% higher than the initial structure.

Key words Exhaust manifold; Face centered combination method; Response surface optimization; Regression equation; Flow uniformity index

Corresponding author: ZHANG Yong, E-mail: yongdxx@hotmail.com.

The project supported by the Northeast Petroleum University Graduate Innovation Research Project (No. JYCX_CX04_2018).

Manuscript received 20190907, in revised form 20191021.

引言

发动机排气歧管的进气口直接与气缸体连接,排气口与排气总管连接,是排气系统中最重要的一环,是发动机缸体和排气系统其它部件的连

接中枢,工作过程中承受着高温废气的不断冲击,因而其结构以及性能直接影响着整个排气系统的性能,进而影响着发动机的安全性、可靠性^[1-3]。

近年来,许多学者在排气歧管的结构参数优化或设计新结构等方面做了大量的 CFD (Computational

* 20190907 收到初稿, 20191021 收到修改稿。东北石油大学研究生创新科研项目 (JYCX_CX04_2018) 资助。

** 刘伟, 男, 1992 年 5 月生, 黑龙江省五常市人, 汉族, 东北石油大学博士研究生, 主要研究方向为机械原理及优化设计。

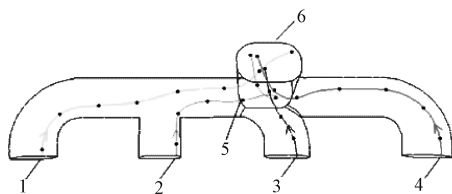
*** 张勇, 男, 1979 年 6 月生, 河南省洛阳人, 汉族, 东北石油大学副教授, 博士, 研究方向为机械工程。

Fluid Dynamics) 模拟及试验研究, 提出了切实可行的设计方案或优化措施^[4-7]。王为凯等^[8]利用计算流体力学软件对某四缸柴油机排气歧管内部流场进行分析, 对支管弯角处给出了优化建议; 邹健等^[9]针对某四缸增压柴油机在低速段扭矩偏小, 分析可以通过重新设计排气歧管使这种情况得到改善; 龚金科, 官庆武^[10]对增压柴油机的涡轮进气口布置方案进行了分析, 建立了某型 4 缸增压柴油机的一维仿真模型, 并通过仿真, 对不同布置方案的柴油机进行了性能对比分析; Emara K 等^[11]采用 Ansys-Cfx 软件对两种不同结构的排气系统模型(现有的模型和修正的模型)进行了模拟, 并在适当的假设条件下, 给出了相应的边界条件和流体特性; Pravin V K 等^[12]采用 CFD 技术降低排气歧管的背压, 对现有的流形进行了改进, 并对新设计进行了分析。上述文献多数采用单因素优化的方法, 未考虑多因素变化下交互作用的影响, 因而采用单因素方式容易丢掉最优结果。本文基于中心复合设计中的面心组合设计与响应面法(Response Surface Methodology, RSM)相结合的方式, 进行综合分析及优化, 确定出各结构间的最佳匹配参数, 定义或提取设计变量及目标函数, 对在多因素交互作用下的重型载货汽车的发动机排气歧管流体结构开展结构参数优化, 具有一定的意义。

1 排气歧管模型结构及参数设置

1.1 排气歧管结构及原理

发动机排气歧管工作原理如图 1 所示, 主要有排气支管入口 1、排气支管入口 2、排气支管入口 3、排气支管入口 4 以及排气出口组成, 从发动机排出的高温气体经过 4 个入口进入到排气歧管内, 由于排气背压的存在, 迫使气体从出口排出。



1-排气支管 1 入口; 2-排气支管 2 入口; 3-排气支管 3 入口; 4-排气支管 4 入口; 5-运动轨迹; 6-排气出口

1-Exhaust branch 1 inlet; 2-Exhaust branch 2 inlet; 3-Exhaust branch 3 Inlet; 4-Exhaust branch 4 inlet; 5-Motion trail; 6-Exhaust outlet

图 1 发动机排气歧管工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of engine exhaust manifold

排气歧管参数化建模位置如图 2 所示, 其中 1、4 支管是对称结构, 因此在参数化过程中只需一组 R_1 、 R_2 即可, 初始流体模型参数如表 1 所示。

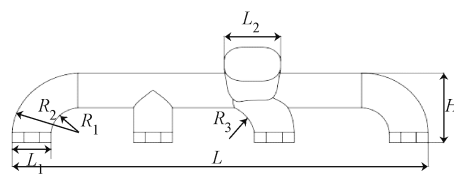


图 2 排气歧管参数化建模位置图

Fig.2 Exhaust manifold parametric modeling location map

表 1 排气歧管初始模型参数

Tab.1 Initial model parameters of the exhaust manifold

结构 Structure	R_1	R_2	R_3	L	L_1	L_2	H
尺寸 Size/mm	22.2	55.38	25	353	33	40	91

1.2 网格划分

网格划分质量直接影响到模拟计算结果精度、计算效率和稳定性。因排气歧管流道结构转角复杂, 对排气歧管进行四面体网格和六面体网格组合形式的划分。为提高网格质量以及真实捕捉边界特征, 采用虚拟拓扑加密, 简化几何细节, 通过创建一系列虚拟面改进网格质量。并开展网格无关性检验, 在不同划分水平下网格单元数分别为 127 823、147 324、209 872、229 595、257 569。对不同网格划分水平的流体域模型进行数值模拟, 并以流动均匀指数为检验指标, 如图 3 所示。结果显示当网格数增大到 229 595 与 257 569 时, 流动均匀指数基本不随网格数变化而发生改变, 说明此时数值模拟结果与网格数无关, 因此选用网格数为 229 595 的模型进行后续的模拟分析, 网格划分情况如图 4 所示, 其网格有效率为 100%。

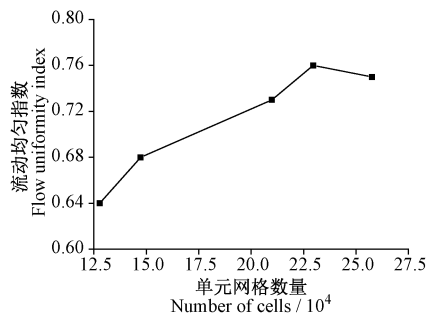


图 3 流动均匀指数随网格数量变化曲线

Fig.3 Flow uniformity index with the number of grids

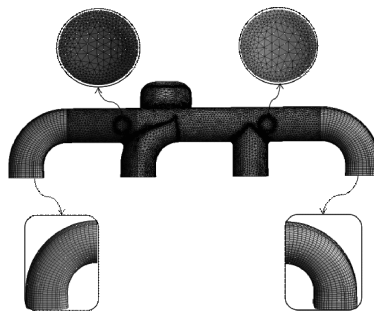


图 4 流体模型的网格划分

Fig.4 Meshing of the fluid model

1.3 参数设置

发动机气缸燃烧后排出的气体,其中含有氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳、醛类和不完全燃烧的其它气体,因此进入排气歧管的气体属于烟气属性,烟气的性能参数^[13-14]如表 2 所示。

表 2 烟气属性参数设置

Tab.2 Smoke property parameter settings

密度 Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热 Specific heat/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热导率 Heat conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	黏度 Viscosity/ ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)
0.354	1 246	0.085 1	4.14×10^{-5}

排气歧管进口采用质量流量入口边界条件,温度 880 ℃,质量流量 0.15 kg/s;排气出口采用压力出口边界条件,温度 790 ℃,压力 0.45 MPa。

2 响应曲面法设计优化

响应曲面法(RSM)是一种参数优化法,其结合了数学法与统计分析法,通过对受若干变量影响的响应值进行拟合分析,达到优化某个响应的目的,基本思想是通过一系列确定性实验,构造一个具有明确表达形式的多项式来近似表达隐式极限状态函数^[15]。

2.1 响应曲面法原理

基于试验设计的响应曲面法就是通过对指定设计空间样本点的集合进行有限次数的试验方案设计,根据试验设计结果拟合出系统响应的全局用无限逼近的方案来代替真实的响应曲面^[16]。因此,构建响应曲面模型关键在于明确设计变量与分析目标之间的关系,选择一个合适的函数形式来描述当前设计变量与分析目标之间的关系^[17]。构造响应曲面的方法有多项式、指数函数和对数函数的拟合,以及神经网络等近似方法,其中广泛应用的是多项式近似模型。

经过试验设计后的系统响应 Y 与设计变量 x 之间的函数式可表示为

$$Y = \hat{y}(x) + \delta \quad (1)$$

式中, $\hat{y}(x)$ 为未知函数的近似函数,即响应面; $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, n 为 n 维独立设计变量; δ 为总误差。

其中,采用多项式响应曲面来逼近系统输入与响应目标之间的关系时,如若采用中心复合设计(CCD)和 Box-Behnken 设计需要用二阶设计模型来逼近响应曲面

$$\hat{y}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \chi_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} \chi_i \chi_j + \varepsilon \quad (2)$$

式中, $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 为奇函数系数; χ_i, χ_j 为基函数; k 为基函数个数。

2.2 响应面法试验设计方案

响应曲面试验设计方法有多种,较为常用的有二次响应曲面试验点 Box-Behnken Design(简称 BBD)和中心复合设计 Central Composite Design(简称 CCD)。其中中心复合设计(CCD)又有三种类型,即外切 CCD、面心 CCD 和内嵌 CCD^[18]。由于外切 CCD 取值超过极限设计尺寸,内嵌 CCD 不能很好地捕捉极限设计尺寸,本文选用面心组合设计样本取值,其中 1、4 支管结构相同对称,优化一个支管即两个同时改变,因此选结构影响最大 1(4)支管的内弯曲半径 R_1 、外弯曲半径 R_2 以及 3 支管的内弯曲半径 R_3 这三个参数(分别以 A、B、C 代表)为设计因素,流动均匀指数为评价指标,进行响应面的优化设计试验。

其中流动均匀性指数是 Weltens 等在 90 年代初建立的一种流场速度均匀性评价指标,基于统计偏差定义的原理,能够全面反映整个通流截面的流体速度分布特性,具有可比性强、使用范围广的特点,计算公式^[19-21]则有

$$\gamma = 1 - \frac{V'}{2V_{\text{mean}}} = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n \frac{\sqrt{(V_j V_{\text{mean}})^2}}{V_{\text{mean}}} \quad (3)$$

式中, V_j 表示测点速度; V_{mean} 表示测量截面的平均流速; n 为测点数量。

本文选择初始结构模型尺寸值为面心组合设计的中心点值, ± 1 结构设计极限值为最低最高水平值,设计因素及水平值如表 3 所示。

表 3 设计因素及水平值

Tab.3 Design factors and level values

名 称 Name	变 量 Variable	水 平 Level		
		-1	0	1
支管 1(4) 弯曲内直径 Branch pipe 1 (4) inside curved diameter	R_1/mm	17.2	22.2	27.2
支管 1(4) 弯曲外直径 Branch pipe 1 (4) outside curved diameter	R_2/mm	45.38	55.38	65.38
支管 3 弯曲内直径 Branch pipe 3 inside curved diameter	R_3/mm	19	25	31

将各因素和水平值按顺序输入 Design-Expert 软件,生成 33 组试验数据,并对每组匹配的设计变量用 Fluent 模拟计算响应目标的流动均匀指数结果如表 4 所示。

2.3 构建模型及检验

通过对试验结果进行分析,对线性函数、二阶模型、2FI 模型、三阶模型进行显著性检验,并通过对模型相关性检测、失拟项检测、显著性检测的数据进行对比,选取适合的数学模型。本试验方案结果采用二阶模型。然后根据选择的模型进行方差分析以及显著性

检验。方差分析中会对影响二次方程模型的常数项、一次项、二次项(交互作用项)、平方项(曲面作用)的显著性进行检验,如表5所示。

表4 响应面设计方案和结果

Tab.4 Response surface design and results

序号 No.	因素水平 Level of factor			响应目标 Target response
	R_1/mm	R_2/mm	R_3/mm	流动均匀指数 Flow uniformity index
1	22.2	55.38	25	0.790 48
2	17.2	55.38	25	0.805 249
3	19.7	55.38	25	0.796 835
4	27.2	55.38	25	0.795 884
5	24.7	55.38	25	0.762 108
6	22.2	45.38	25	0.789 198
7	22.2	50.38	25	0.767 27
8	22.2	65.38	25	0.706 365
9	22.2	60.38	25	0.768 099
10	22.2	55.38	19	0.673 651
11	22.2	55.38	22	0.759 184
12	22.2	55.38	31	0.759 453
13	22.2	55.38	28	0.801 468
14	19.227	49.434	21.432 4	0.807 607
15	20.713 5	52.407	23.216 2	0.774 356
16	25.173	49.434	21.432 4	0.702 595
17	23.686 5	52.407	23.216 2	0.784 061
18	19.227	61.326	21.432 4	0.740 98
19	20.713 5	58.353	23.216 2	0.794 905
20	25.173	61.326	21.432 4	0.731 698
21	23.686 5	58.353	23.216 2	0.730 17
22	19.227	49.434	28.567 6	0.803 178
23	20.713 5	52.407	26.783 8	0.781 948
24	25.173	49.434	28.567 6	0.779 578
25	23.686 5	52.407	26.783 8	0.801 095
26	19.227	61.326	28.567 6	0.703 36
27	20.713 5	58.353	26.783 8	0.808 072
28	25.173	61.326	28.567 6	0.780 238
29	23.686 5	58.353	26.783 8	0.777 439
30	19.227	49.434	25.073	0.819
31	20.713 5	50.38	25	0.818
32	19.227	49.434	23.216 2	0.807 54
33	20.713 5	49.434	25.073	0.816 52
34	19.227	50.38	25	0.819 7
35	22.2	55.38	25	0.770 37
36	22.2	55.38	25	0.790 48
37	22.2	55.38	25	0.790 48
38	22.2	55.38	25	0.790 48

由表5可知,因大的 F 值和小的 P 值代表相关系数的显著性。根据表5中模型的 $F=16.25$, $P_r>F$ 值 $<0.000\ 1$,说明该二次模型是高度显著的,拟合精度高,可选择用该近似模型进行后期的优化设计;失拟项 $F=3.77$, $P_r>F=0.1025>0.05$,说明失拟项不显著,表示该近似模型在整个回归区域内拟合较好。根据试验设计值进行逼近得出多元回归拟合方程表达式

$$Y = 0.79 - 0.014R_1 - 0.029R_2 + 0.031R_3 + 0.054R_1R_2 + 0.058R_1R_3 - 0.019R_2R_3 + 0.012R_1^2 - 0.038R_2^2 - 0.066R_3^2 \quad (4)$$

根据拟合的回归方程进一步完成误差分析,分别得出精密度、可信度、多元相关系数、精确度等值,如表6所示。多元相关系数 $R\text{-Squared}=0.839\ 3$, $R\text{-Squared}$ 越接近于1,说明该模型相关性越好,试验得出的结果与预测值差距越小,因此本设计的相关系数较好,试验得出的结果与预测值较小;该回归模型的变异系数 $C_v=2.130\%<10\%$,表明该试验得出的模型可信度及精确度高;精密度(Adeq Precision)为有效信号与噪声的比,15.582大于4视为合理,因此表中数据符合要求。因此,根据以上分析得知拟合的回归方程均符合检验原则,可合理解释各设计变量与排气歧管内部流场均匀指数之间的关系。

图5~图7为残差的正态概率分布图及残差与预测值分布图。由图可知,残差的正态概率分布基本都在一条直线上,且预测值与实际值也在一条直线上,预测值与残差应无规律的分布在0残差线的两侧,因此可看出,利用响应面法拟合排气歧管均匀度的模型的适应性较好。

2.4 响应曲面和等高线图

由于响应曲面优化方法克服了正交试验不能给出直观图形的不足,因此可根据二次方程模型分别得出试验因素间的交互作用,采用三维立体响应曲面和等高线图表达。其中当响应曲面形状为山丘形时,有极大值存在;当为山谷形曲面,有极小值存在;当两端同时存在极大值或极小值时,为马鞍形曲面,等高线图中椭圆形状表示因素间交互作用显著,圆形则表示交互作用不显著。

从图8的等高线图可以直观的看出,排气支管1(4)弯曲部分内半径和外半径的等高线图呈椭圆形,表明交互作用显著。从三维图可以看出,排气歧管流动均匀指数在合适的内弯曲半径和外弯曲半径下,具有最大值,该极大值出现在较低的内弯曲半径(17.2 mm~23.2 mm)和较低的外弯曲半径(45.38 mm~60.38 mm)范围内。

从图9的等高线图可以直观的看出,排气1(4)支管内弯曲半径与3支管弯曲半径对均匀指数的交互作用两侧呈椭圆形,交互作用显著。从三维图可以看出,排气1支管内弯曲半径以及3支管内弯曲半径变化范围的两者最小值组合点和最大值组合点均存在流动均匀系数极大值点。与图8综合对比分析,发现3支管的弯曲半径最佳取值范围应是(19 mm~28 mm)。

表 5 方差分析、方程显著性检验及回归方程表

Tab.5 Variance analysis, equation significance test and regression equation table

方差类型 Variance type	变差平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	检验统计量 F 值 F-Value	概率 Probability $P_i > F$	显著性 Significance
Model	0.040	9	4.438×10^{-3}	16.25	<0.000 1	***
R_1	1.235×10^{-3}	1	1.235×10^{-3}	4.52	0.042 5	*
R_2	5.990×10^{-3}	1	5.990×10^{-3}	21.93	<0.000 1	***
R_3	5.686×10^{-3}	1	5.686×10^{-3}	20.82	<0.000 1	***
$R_1 R_2$	3.800×10^{-3}	1	3.800×10^{-3}	13.91	0.000 9	**
$R_1 R_3$	3.681×10^{-3}	1	3.681×10^{-3}	13.48	0.001 0	**
$R_2 R_3$	3.848×10^{-4}	1	3.848×10^{-4}	1.41	0.245 3	不显著 Not significance
R_1^2	3.051×10^{-4}	1	3.051×10^{-4}	1.12	0.299 6	不显著 Not significance
R_2^2	3.133×10^{-3}	1	3.133×10^{-3}	11.47	0.002 1	**
R_3^2	9.443×10^{-3}	1	9.443×10^{-3}	34.57	<0.000 1	***
残差 Residual	7.649×10^{-3}	28	2.732×10^{-4}			
失拟项 Lack of fit	7.325×10^{-3}	24	3.052×10^{-4}	3.77	0.102 5	不显著 Not significance
纯误差 Pure error	3.235×10^{-4}	4	8.088×10^{-5}			
总离差 Total deviation	0.048	37				

注: $P_i > F$ 为无显著影响的概率, $\leq 0.000 1$ 为高度显著, 用 *** 表示, ≤ 0.01 为较显著, 用 ** 表示, ≤ 0.05 为显著, 用 * 表示。

Tips: $P_i > F$ is the probability without significant impact, $\leq 0.000 1$ is highly significant, symbol ***, ≤ 0.01 is more significant, symbol **, ≤ 0.05 is significant, symbol *.

表 6 回归方程的误差统计分析表

Tab.6 Error statistical analysis table of regression equation

统计项目 Statistical item	值 Value	统计项目 Statistical item	值 Value
标准偏差 Std. Dev.	0.017	离差平方和 R-Squared	0.839 3
均值 Mean	0.78	校正离差平方和 Adj R-Squared	0.787 6
差异百分比 C.V. /%	2.13	预测离差平方和 Pred R-Squared	0.682 1
预测均方 PRESS	0.015	精密度 Adeq precision	15.582

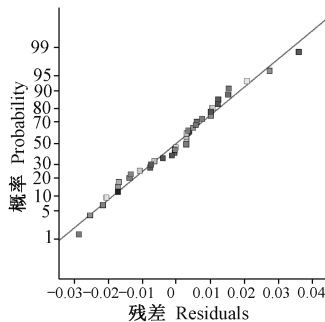


图 5 残差的正态概率分布图

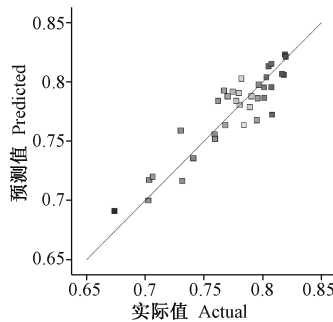


图 6 实际值与预测值分布图

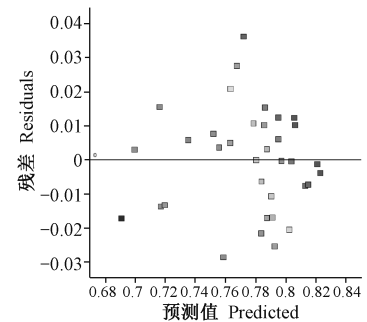


图 7 预测值与残差分布图

Fig.5 Normal probability distribution of residuals

Fig. 6 Distribution of actual and predicted values

Fig.7 Predicted value and residual distribution map

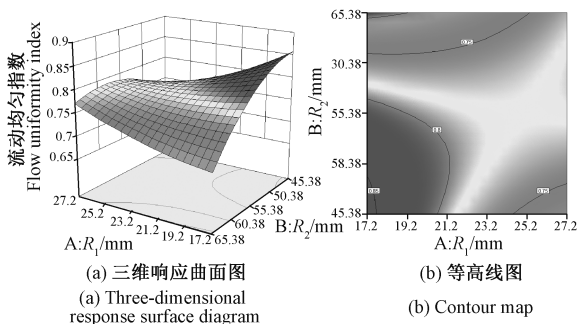


图 8 排气管 1(4) 内外弯曲半径对均匀指数的交互影响

Fig.8 Interaction of the inner and outer bending radius of the exhaust pipe 1(4) on the uniformity index

从图 10 的等高线图可以直观的看出, 排气 1(4) 支管内弯曲半径不变情况下, 外弯曲半径与 3 支管内弯曲半径的曲线呈圆形, 表明交互作用不显著。

2.5 优化前后对比

Design-Expert 软件 Optimization 优化部分根据理论预测提供最佳流动均匀指数的候选设计点, 其中优化前后的排气歧管参数对比如表 7 所示, Design-Expert 软件根据拟合出的方程对最优结构参数的取值预测出排气歧管流动均匀指数达到 0.82。

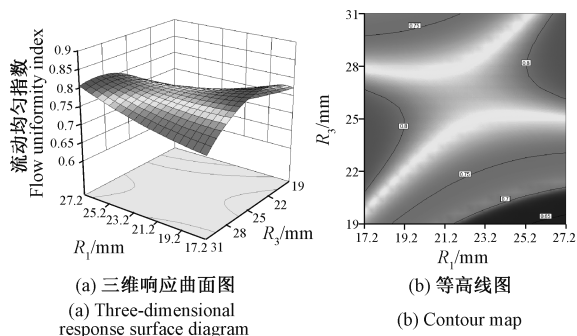


图9 排气支管1(4)内弯曲半径与3支管弯曲半径对均匀指数的交互影响

Fig.9 Interaction between the bending radius of the exhaust pipe 1(4) and the bending radius of the three pipes on the uniformity index

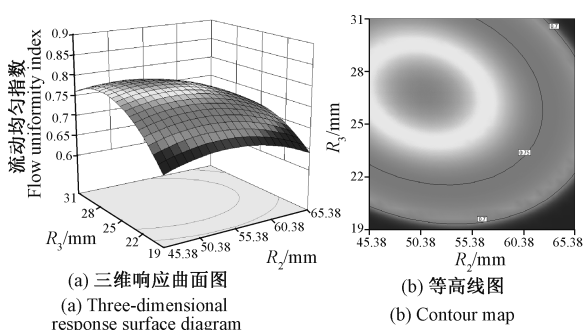


图10 排气支管1(4)外弯曲半径与支管3内弯曲半径对均匀指数的交互影响

Fig.10 Interaction between the outer bending radius of the exhaust pipe 1(4) and the bending radius of the three branch pipes on the uniformity index

表7 优化前后参数变化

Tab.7 Parameter changes before and after optimization

类 型 Type	优化前取值 Before optimization value/mm	优化后取值 After optimization value/mm
支管1(4)弯曲内直径 Branch pipe 1 (4) inside curved diameter	22.2	18.676
支管1(4)弯曲外直径 Branch pipe 1 (4) outside curved diameter	55.38	50.185
支管3弯曲内直径 Branch pipe 3 inside curved diameter	25	23.362
流动均匀指数 Flow uniformity index	0.76	0.82

上述结果研究发现,应用响应曲面优化方法优化后的结构模型的流动均匀指数比优化前提高了6个百分点,说明响应面法可从全局角度智能的对结构进行参数优化组合,缩短CAD建模及网格划分时间,并可

实现多参数条件下交互性的同时优化,有效提高了工作效率,优化前后半径尺寸变化如图11所示。

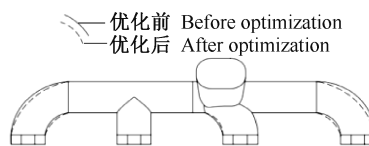


图11 排气歧管优化前后对比图

Fig.11 Comparison of the exhaust manifold before and after optimization

3 模拟验证

为了验证应用响应曲面优化方法拟合出方程预测值的准确性,对排气歧管进行两种极限工况下的模拟分析,综合对比分析:

(1)按照发动机气缸1-3-4-2工作的顺序,分别计算各支管单独排气时的流动均匀指数变化;(单独排气工况下,各支管单独排气时均匀系数相对组合排气时均匀系数较低,由于其它缸不排气会产生缸内串气,以及涡流现象发生明显);

(2)按4缸均匀分配,组合排气时的工况计算排气流动均匀指数(组合排气工况下,流动均匀指数比单独排气时高,各缸气体都向出口运动,串气以及涡流现象不明显)。

为便于模拟后可对截面云图进行详细的对比分析,本文设定选取截面位置如图12所示。

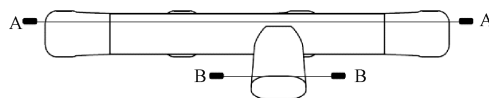


图12 排气歧管截面选取位置图

Fig.12 Exhaust manifold section selection location map

图13~图17为优化改进前、后流场模型A截面和出口B截面的速度对比云图。根据文献以及排气歧管实际工作报告可知,排气歧管的弯曲半径位置由于气体流动过程中通流截面面积的变化以及造成的沿程阻力损失加剧等原因,弯曲部位对流场的均匀程度有很大的影响,因此主要设计优化以及观察部位应为排气歧管的弯曲半径以及出口截面位置。对A截面的云图对比发现,各支管单独排气时,1、3、4支管的弯曲半径位置速度最大的红色区域明显减少,颜色梯度分布更均匀,即使2支管部位未进行相应优化,单独排气时,2和3支管的中间区域红色面积得到减少。组合排气时,优化后的排气歧管模型转弯部位以及中间高速区域得到明显改善。优化后B截面的云图红色区域明显减少,速度差值减弱,温度梯度分布得到明显改善。

通过公式(3)和Fluent数值模拟结果将优化后流

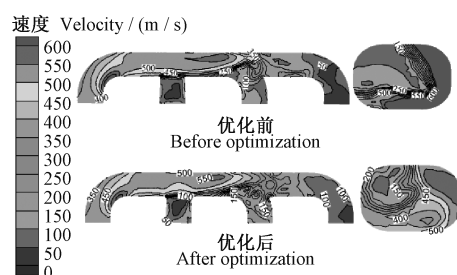


图 13 支管 1 单独排气时的优化前后速度均匀性对比

Fig.13 Comparison of velocity uniformity before and after optimization of branch pipe 1 when exhausted separately

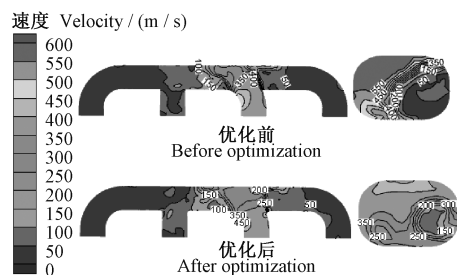


图 14 支管 3 单独排气时的优化前后速度均匀性对比

Fig.14 Comparison of speed uniformity before and after optimization of branch pipe 3 when exhausted separately

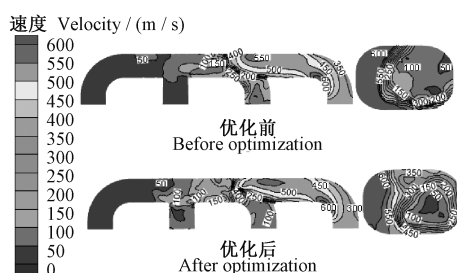


图 15 支管 4 单独排气时的优化前后速度均匀性对比

Fig.15 Comparison of velocity uniformity before and after optimization of branch pipe 4 when exhausted separately

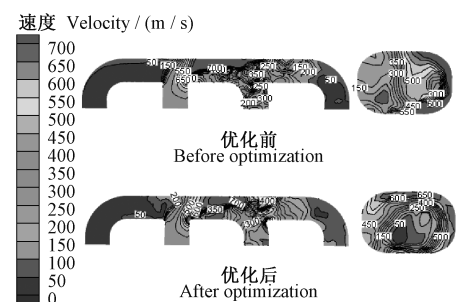


图 16 支管 2 单独排气时的优化前后速度均匀性对比

Fig.16 Comparison of speed uniformity before and after optimization of branch pipe 2 when exhausted separately

动均匀指数与优化前流动均匀指数表格中数据进行柱状图分布及变化趋势曲线进行对比如图 18 所示。从柱状图数值以及曲线变化趋势表明,无论是各支管单

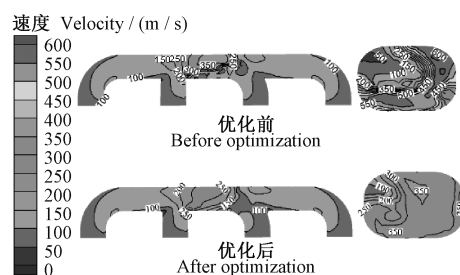


图 17 支管 1-3-4-2 同时排气时的优化前后速度均匀性对比

Fig.17 Comparison of velocity uniformity before and after optimization of branch pipe 1-3-4-2 at the same time

独排气工况还是组合排气工况,优化后的支管出口截面的速度均匀指数值均得到了明显提高,尤为突出的是当四支管组合排气时,出口流动均匀指数更是提高了 6 个百分点,所以,无论各支管单独排气还是组合排气时都表明优化后的排气歧管模型在出口截面速度均匀性较好,较优化前得到了明显的提高。

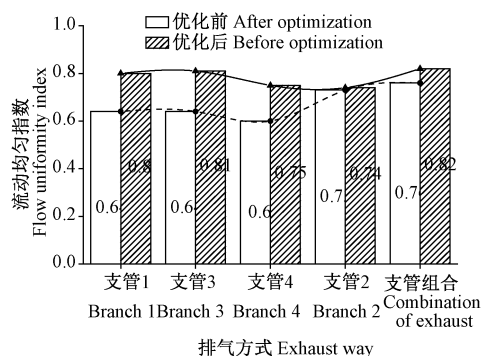


图 18 排气歧管优化前后模型流动均匀指数变化对比图

Fig.18 Comparison of the variation of the flow uniformity index of the model before and after the optimization of the exhaust manifold

4 结论

本文通过对排气歧管基于面心组合的响应曲面优化设计,以及最后的仿真模拟研究可以得出以下结论:

1) 利用响应曲面优化设计法,对发动机排气歧管的 1(4)支管的内外弯曲半径和 3 支管的内弯曲半径进行了参数优化,给出了 33 组试验设计数据,分析得出了最优结构参数。

2) 通过数值模拟进行了验证,证明了优化后的排气歧管流动均匀指数当四支管同时排气时最高比优化前提高了 6%。截面速度分布云图等也都证明了优化后的排气歧管整体性能优于优化前。

3) 响应曲面优化方法适用于排气歧管的结构优化设计,且更快速、更高效。

参考文献 (References)

- [1] 许艳芝,雷晓波,文敏,等. 某发动机喷管构件高温载荷测量[J].机械强度,2019,41(3):696-701.
XU YanZhi, LEI XiaoBo, WEN Min, et al. High temperature load measurement for nozzle component of a certain aero-engine[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(3):696-701 (In Chinese).
- [2] 谭冠军,王加阳. 车辆发动机可靠性寿命试验数据的预测方法[J].机械强度,2017,39(3):697-701.
TAN GuanJun, WANG JiaYang. Forecasting method of vehicle engine reliability life test data[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(3):697-701 (In Chinese).
- [3] 刘水长,李礼夫,张勇,等. 基于双场耦合的发动机舱内流场散热分析与结构改进[J].汽车工程,2017,39(8):879-888.
LIU ShuiChang, LI LiFu, ZHANG Yong, et al. Thermal analysis and structural improvement of flow field in engine compartment based on two-field coupling[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(8):879-888 (In Chinese).
- [4] Ahmad Faraz, Tomer Vipul, Kumar Ashwani, et al. FEA simulation based thermo-mechanical analysis of tractor exhaust manifold[J]. CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, 2016;173-181.
- [5] Ma F, Wu J, Wang G. Double-sided fluid-structure coupling dynamic thermal analysis method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(6):894-898.
- [6] 解芳,冯长虹,王召兴,等. 汽车发动机水泵带轮结构改进设计[J].机械强度,2014,36(2):285-289.
XIE Fang, FENG ChangHong, WANG ZhaoXing, et al. Improved structure design of belt wheel in automobile engine water pump[J]. Journal of Mechanical Strength, 2014, 36(2):285-289 (In Chinese).
- [7] 杨维平,侯亮,蔡惠坤,等. 基于模态分析的挖掘机发动机罩结构优化[J].机械强度,2016,38(3):537-542.
YANG WeiPing, HOU Liang, CAI HuiKun, et al. Structural optimization of excavator engine hood based on modal analysis[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(3):537-542 (In Chinese).
- [8] 王为凯,王军,唐苏阳,等. 某四缸柴油机排气歧管流场分析及结构优化[J].科技视界,2017(9):174-175.
WANG WeiKai, WANG Jun, TANG SuYang, et al. Flow field analysis and structural optimization of a four-cylinder diesel engine exhaust manifold[J]. Science and Technology, 2017(9):174-175 (In Chinese).
- [9] 邹健,吴建财,严金龙. 四缸柴油机排气歧管的设计及内流场分析[J].内燃机与动力装置,2015,32(5):42-45.
ZOU Jian, WU JianCai, YAN JinLong. Design and internal flow field analysis of exhaust manifold of four-cylinder diesel engine[J]. Internal Combustion Engine and Power Plant, 2015, 32(5):42-45 (In Chinese).
- [10] 龚金科,官庆武. 4缸柴油机排气歧管分析与设计的研究[J].汽车工程,2013,35(4):354-357.
GONG JinKe, GUAN QingWu. Study on analysis and design of exhaust manifold of 4-cylinder diesel engine[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(4):354-357 (In Chinese).
- [11] Emara K, Emara A, Razek EA. CFD analysis & experimental investigation of a heavy duty diesel engine exhaust system[J]. Proceedings of the Asme International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2016, 6(2):123-127.
- [12] Pravin V K, Umesh K S, Rajagopal K, et al. Simulative analysis of flow through exhaust manifold for improved volumetric efficiency of multi cylinder petrol engine[J]. World Journal of Engineering, 2012, 9(3):221-226.
- [13] 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,2010,38(1):80-85.
HUANG Jian, LIN XiaoHui, YAN ShiRong. Numerical simulation of flow field in diesel exhaust manifold based on FLUENT[J]. Journal of Fuzhou University, 2010, 38(1):80-85 (In Chinese).
- [14] 郑习娇,陈吉清,兰凤崇,等. 发动机排气歧管流固耦合热特性分析[J].机械设计与制造工程,2017,46(12):13-17.
ZHENG XiJiao, CHEN JiQing, LAN FengChong, et al. Analysis of fluid-solid coupling thermal characteristics of engine exhaust manifold[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(12):13-17 (In Chinese).
- [15] 张春宜,王爱华,孙田,等. 基于双重响应面法的涡轮叶盘蠕变可靠性分析[J].机械强度,2019,41(4):881-886.
ZHANG ChunYi, WANG AiHua, SUN Tian, et al. Creep reliability analysis of turbine blisk based on dual response surface method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(4):881-886 (In Chinese).
- [16] 方俊涛. 响应曲面方法中试验设计与模型估计的比较研究[D]. 天津:天津大学,2011:17-24.
FANG JunTao. Comparative study of experimental design and model estimation in response surface method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011:17-24 (In Chinese).
- [17] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J].实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.
LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of response surface method in experimental design and optimization[J]. Laboratory Research and Exploration, 2015, 34(8):41-45 (In Chinese).
- [18] 朱晴. 基于流固耦合的排气歧管热强度复合因素影响规律的研究[D]. 长春:吉林大学,2014:119-127.
ZHU Qing. Study on the influence law of composite factors of exhaust manifold heat intensity based on fluid-solid coupling[D]. Changchun: Jilin University, 2014:119-127 (In Chinese).
- [19] 李坦,靳世平,黄素逸,等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J].热力发电,2013,42(11):60-63.
LI Tan, JIN ShiPing, HUANG SuYi, et al. Comparison and application of evaluation indexes for flow field velocity distribution uniformity[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11):60-63 (In Chinese).
- [20] 张力,闫云飞,冉景煜,等. 天然气汽车三效催化器流场均匀性数值模拟及催化剂优化[J].化工学报,2005(9):1679-1684.
ZHANG Li, YAN YunFei, RAN JingYu, et al. Numerical simulation of flow field uniformity and catalyst optimization for three-way catalytic converter of natural gas vehicles[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005(9):1679-1684 (In Chinese).
- [21] 陈园明,陈怀望. 某发动机排气歧管优化设计[J].汽车工程师,2012(5):38-40.
CHEN YuanMing, CHEN HuaiWang. Optimization design of an engine exhaust manifold[J]. Automotive Engineer, 2012(5):38-40 (In Chinese).