

基于伴随求解器的某发动机水套优化分析研究

Optimization Study of an Engine Water Jacket Based on Adjoint Solver

钱丁超 段加全 陈明 白洪江 宋志平 高井辉
(中国第一汽车股份有限公司研发总院)

摘要: 水套优化是发动机热管理系统设计的重要部分,直接影响到发动机性能。本文使用 Fluent 伴随矩阵求解器,以减小压降为优化目标,对某发动机水套进行非参数化优化。最终水套总体的总压压降减小了 5.2%,排气歧管总压压降减小了 4.2%,有效降低了水套流阻。

关键词: 发动机水套 非参数化优化 Fluent 伴随求解器

Abstract: Water jacket optimization is an important part of the engine thermal management system design, which directly affects engine performance. In this paper, adjoint solver is used in the nonparametric optimization of an engine water jacket, and the optimization target is to reduce the pressure drop. The total pressure drop of the water jacket is reduced by 5.2%, and the total pressure drop of the exhaust manifold is reduced by 4.2%, which effectively reduce the flow resistance of the water jacket.

Key words: Water jacket, Nonparametric optimization, Fluent, Adjoint solver

1. 前言

随着排放法规和油耗法规的日益严苛,乘用车汽油机对高效率、低排放的要求也越来越高,发动机设计的精细化程度也在逐步提高。发动机水套作为发动机热管理的重要组成部分,其设计好坏对发动机热效率、爆震控制都有着重要影响,冷却不足容易造成局部过热,在热疲劳的作用下导致缸体损坏,或者增加发动机爆震的风险,冷却过度则可能因热机时间过长、散热损失过多导致发动机油耗升高,因此对发动机水套的设计与优化越来越精细化。合理的流量分配、满足各区域散热需求、低流阻是水套设计优化的最终目标。传统的设计流程对工程师的设计经验要求较高,经过多轮优化才能最终达成设计目标,因此工程师的经验直接影响到设计开发周期。

随着 CFD 仿真技术的不断进步,自动优化设计的应用越来越广泛。Fluent 的专用工具伴随矩阵求解器(Adjoint Solver)可以提供一个流体系统详细的性能敏感性数据,工程师根据性能敏感性数据进一步运用网格自动变形技术对系统进行设计改进。本文使用 fluent 的伴随矩阵求解器对某发动机水套进行非参数化优化,为水套的优化方向提供指导和参考。

2. 基于 Adjoint Solver 的优化流程

2.1 基本优化流程

使用 Fluent 伴随求解器进行优化分析的流程如图 1 所示。首先对水套模型进行流动求解计算。随后开启 Adjoint 模块,分析形状对水套压降的敏感性,根据计算结果确定可优化的区域。设置网

格变形参数以完成网格变形，再对变形后的模型进行求解计算。可设置不同的网格变形参数对比目标优化效果，选择效果最好的网格变形方案。自动变形得到的模型并不能直接用于生产制造，需要 CAD 工程师通过逆向工程等方法重新设计 CAD 模型。最后对新建的 CAD 模型进行计算复验，确定最终的优化效果。

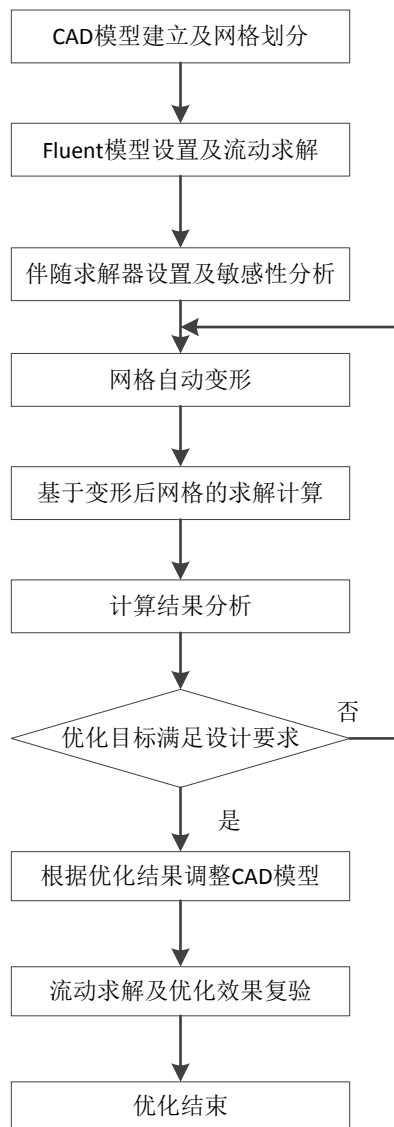


图1 水套优化流程

2.2 Fluent 模型设置

水套流动求解为稳态计算，将冷却液在水套内的流动简化为不可压缩绝热流动，湍流模型为 $k-\epsilon$ 模型，采用标准壁面函数处理近壁面的流动。简化水泵入口设置为速度进口边界。为了保证计算收敛性，对水流出口网格进行拉伸，将拉伸后的水流总出口设置为压力出口边界。

在使用伴随求解器模块时，优化目标设置为压降减小，求解设置采用标准压力差分格式，离散格式采用一阶迎风格式^[1]。设置网格自动变形参数时，变形方式采用 objective reference change 模式，优化目标设定为降低压降。

3. 计算结果分析

3.1 原方案形状敏感性分析结果

水套形状对压降的敏感性计算结果如图 2 所示，由图可见对压降比较敏感的区域集中在缸体与分水腔的通道、排气歧管上水口附近的管路以及进排气门周围的水套。综合考虑水套制造工艺与整机布置等因素，部分区域形状不能修改，最终选择两个位置进行优化：1. 排气侧分水腔与缸体水套的连接通道，该位置的形状敏感性分析结果如图 3 所示；2. 排气歧管最靠近水泵的支路，如图 2 (b) 圆圈中所示区域。

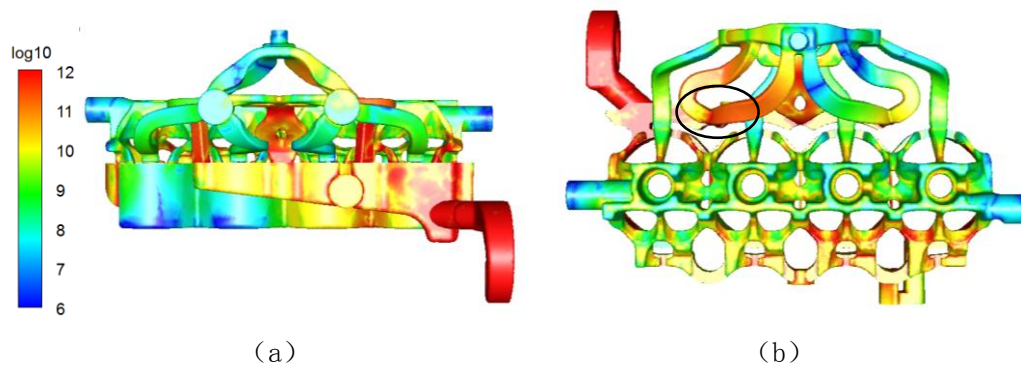


图 2 水套形状敏感性分析结果

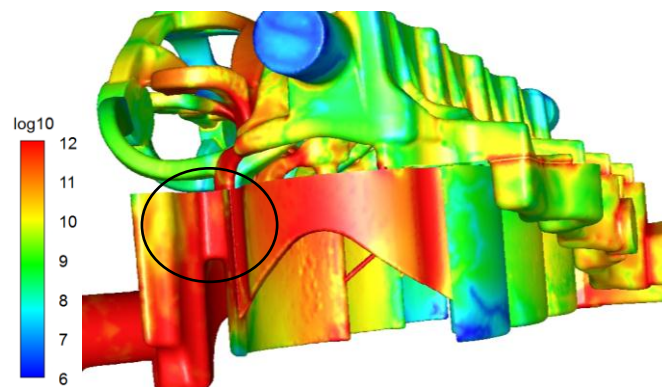
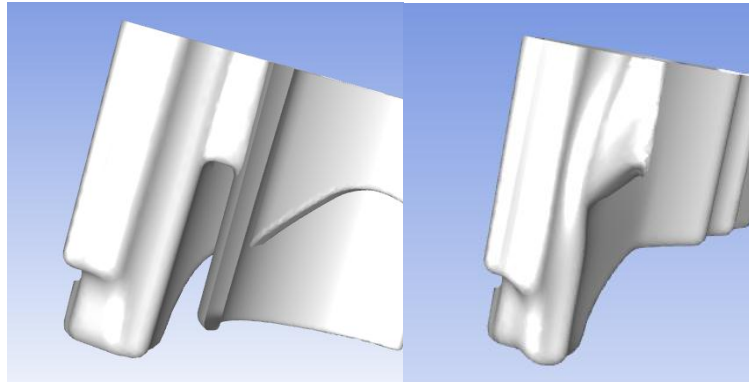


图 3 分水腔通道处形状敏感性分析结果

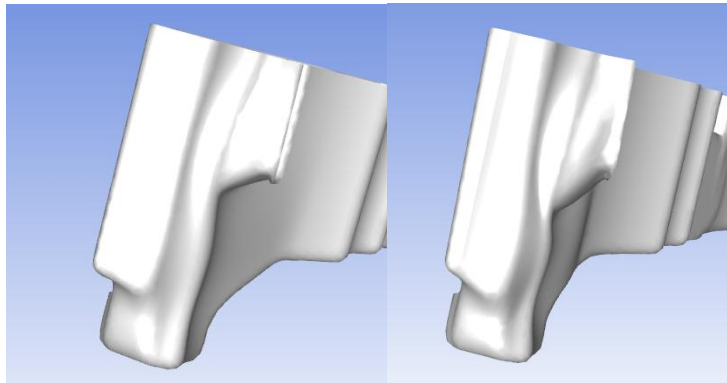
3.2 不同网格变形方案的优化结果对比

首先对排气侧分水腔与缸体水套的连接通道进行优化，进行网格自动变形时对多个不同比例因子的变形方案进行了对比。比例因子较小时网格变形量较小，比例因子较大时网格变形量大，比例因子过大时由于网格畸变会形成负体积网格，因此本文选择了比例因子 1、3、5 这三种情况进行对比。图 4 (a) 原模型分水腔与缸体水套通道的几何形状，图 4 (b)、(c)、(d) 分别为比例因子为 1、3、5 时变形后的形状，每次进行网格变形时选择的变形区域相同。由图 4 可以看出比例因子越大，网格变形量越大。表 1 对比了不同变形方案重新进行流动求解后的总压压降，可以看出总压压降分别降低了 1.3%、3.4%和 4.7%，比例因子越大，优化效果越明显。



(a) 原方案

(b) 比例因子为 1



(c) 比例因子为 3

(d) 比例因子为 5

图 4 变形比例因子对网格变形量的影响对比

表 1 不同网格变形比例因子对发动机水套压降的影响

变形因子	原方案	1	3	5
水套总体压降 (Pa)	161161.5	159005.1	155666.7	153626.8
压降降低幅度 (%)	—	1.3	3.4	4.7

对排气歧管最靠近水泵的支路进行优化，优化区域如图 5 (a) 所示，入口面积不变，优化区域主要是水流一分为二的交叉处，该区域网格变形前几何形状如图 5 (b) 所示，设置变形比例因子为 15 进行自动变形后的几何形状如图 5 (c) 所示。统计该管路入口到压力出口的总压压降，优化前后压降情况如表 2 所示，总压压降降低了 1.4%。

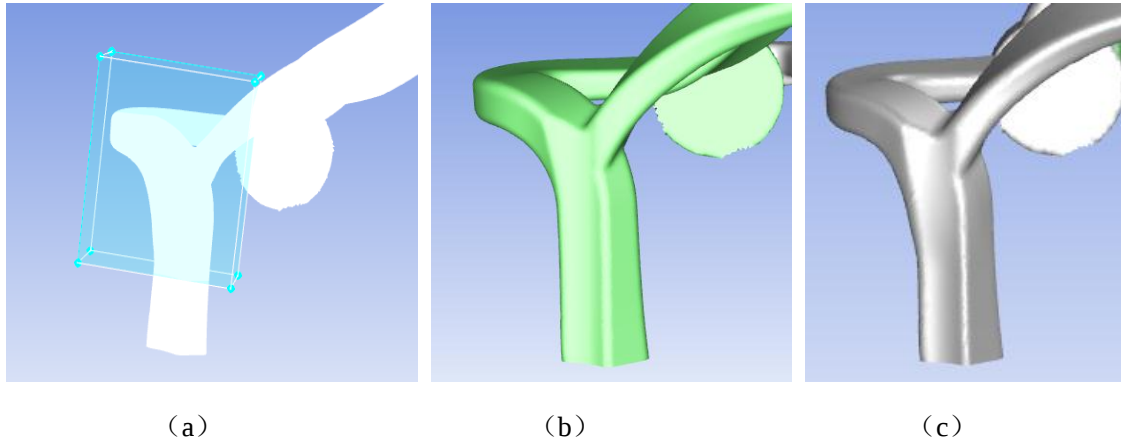


图 5 排气歧管网格变形对比

表 2 排气歧管管路压降对比

	原方案	比例因子 15	压降降低幅度 (%)
排气歧管入口 1 至出口处压降 (Pa)	32205.0	31765.7	1.4

4. 最终优化结果

伴随求解器自动变形得到的网格文件并不能直接用于生产制造，本文由 CAD 工程师根据计算优化结果手动调整水套几何模型设计。图 6 (a) 为变形比例因子为 5 时的分水腔通道形状，图 6 (b) 为 CAD 工程师重新设计的几何形状。图 7 (a) 为变形比例因子为 15 时的排气歧管形状。图 7 (b) 为排气歧管重新设计后的形状，同时最终方案对排气歧管各支路的流量分配也进行了优化。最终水套总体总压压降减小了 5.2%，排气歧管总压压降减小了 4.2%。

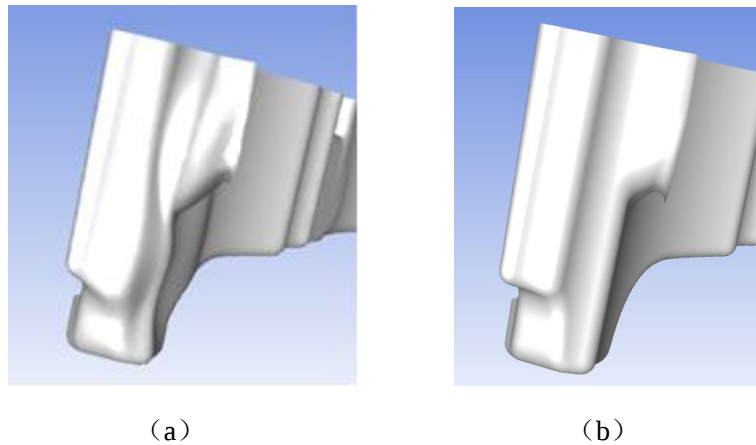
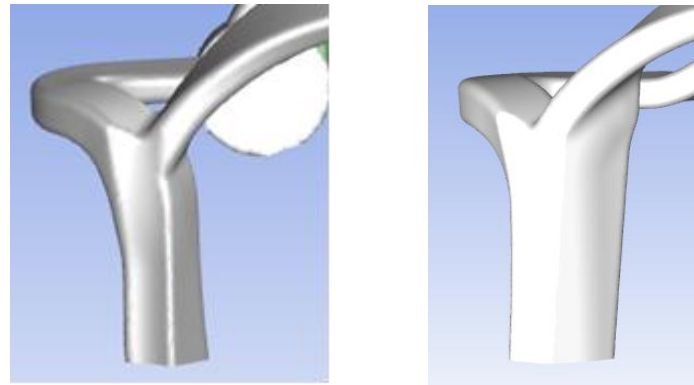


图 6 分水腔通道形状对比



(a)

(b)

图 7 排气歧管形状对比

表 3 最终水套方案优化效果

	原方案	最终方案	压降降低幅度 (%)
水套总体压降	161161.5	152837.7	5.2
排气歧管入口 1 至出口处压降 (Pa)	32205.0	30861.7	4.2

5. 结论

本文使用 Fluent 软件的伴随求解器模块对水套进行优化研究，主要得出了以下结论：

- (1) 使用伴随求解器的敏感性分析功能可快速找出对压降比较敏感的区域，进而为进一步优化提供指导；
- (2) 进行网格自动变形时，比例因子较小时网格变形量较小，比例因子较大时网格变形量大，比例因子过大时由于网格畸变会形成负体积网格，因此需要合理设置变形参数；
- (3) 最终水套总体总压压降减小了 5.2%，排气歧管总压压降减小了 4.2%，水套流阻明显降低。

6. 参考文献

- [1] 张志强，陈群，戴鑫鑫，侯亚帮. 基于伴随求解器的某汽油机进气歧管优化分析[C]. 2016 年 IDAJ-China 用户论文集.