

结构与可靠性

高功率密度船用柴油机冷却系统优化仿真分析

陆传荣¹, 李 佳², 苗伟驰², 张国勇²

(1. 海军驻七一一研究所军事代表室, 上海 201108; 2. 七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 针对某高功率密度船用大功率柴油机开发设计过程中, 缸内热负荷增加导致缸套等受热零部件温度过高的情况, 对冷却水腔结构进行局部优化。采用数值模拟的方法对改进前后的流场和温度场进行了对比分析, 结果表明: 优化后的冷却系统使整体流动阻力减小 3% 的同时, 明显改善缸盖和缸套关键区域的温度和热负荷情况, 其中缸盖排气阀座位置最高温度下降 30 °C, 第一道活塞环位置缸套平均温度下降 8 °C。

关键词: 船用柴油机; 冷却系统; 优化; 仿真

中图分类号: TK424.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)02-0020-04

Simulation Study on Optimization of High Power Density Marine Diesel Engine Cooling System

Lu Chuanrong¹, Li Jia², Miao Weichi², Zhang Guoyong²

(1. Naval Deputy Office of Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Aiming at the phenomenon that the increase of thermal loads in the cylinder of high power density marine diesel engine causes overheating of cylinder liner and other parts in the development and design process, the cooling chamber was partially optimized. The flow field and temperature field before and after the optimization were compared by using simulation method. The results showed that the optimized cooling system not only reduced the total flow resistance by 3%, but also substantially decreased the temperature and thermal loads of cylinder head, cylinder liner and other key components. The highest temperature at the exhaust valve seat was decreased by 30 °C, and the average temperature at the first piston ring was decreased by 8 °C.

Key words: marine diesel engine; cooling system; optimization; simulation

0 引 言

缸盖和缸套是燃烧室的关键组成部分^[1], 在柴油机工作过程中其内侧接触高温高压燃气, 外侧接触冷却液, 工作环境恶劣。缸盖和缸套的热状态和变形情况在某种程度上决定了柴油机的寿命^[2]。随着排放法规的日益严格^[3], 以及柴油机功率密度和强化指标的不断提高, 对柴油机零部件的热负荷要求也越来越高^[4], 缸盖和缸套热负荷问题更

需要特别关注^[5-6]。

在某船用大功率柴油机开发设计过程中发现: 随着功率密度的提高, 缸内热负荷显著增大, 缸盖排气侧位置热负荷偏高, 其中第一道活塞环位置的缸套温度分布不均匀且冷却温度偏高, 给缸盖和缸套的可靠性带来了很大的风险。针对这一问题, 对冷却水腔结构进行了调整, 重点优化了冷却水进口方向, 对重点关注区域进行了结构性引导, 并对优化效果做有限元仿真分析。计算结果表明: 冷却水

收稿日期: 2015-11-08

作者简介: 陆传荣(1974-), 男, 工程师, 主要研究方向为船舶动力装置设计。

腔结构的调整能够有效改善缸盖和缸套等关键区域的温度和热负荷。

1 冷却水腔结构改进方案

研究的大功率船用柴油机采用一缸一盖的冷却结构（图 1），冷却方式为缸盖、缸套串联冷却。原冷却水腔模型如图 2 所示，可以看出冷却水由进口流入，经过缸套水侧外表面，再通过缸盖上的通道进入缸盖，对缸盖进行冷却。原冷却水腔进口位置靠近缸套中部，冷却水从进口进入缸套后向两侧均匀分布，可能会因水流交汇而影响流动状态；且由于对进排气侧冷却效果相当，有可能造成进气侧过冷而排气侧过热的结果。

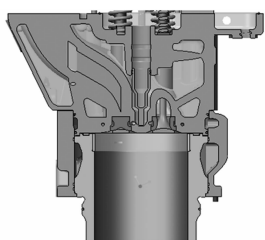


图 1 冷却水腔结构模型

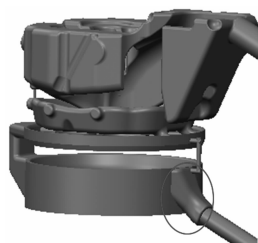


图 2 原缸套冷却水腔模型

考虑到柴油机实际运行过程中缸盖排气侧冷却不充分，且存在局部温度过高的情况。为了有效降低排气侧的热负荷以及关键位置的温度，在结构可以保证的前提下，设计上应尽可能地将冷却水进口有针对性地向排气侧偏转一个角度，并适当调整进水口进水位置以及进排气侧圆角尺寸，加强对排气侧冷却水进口水流的引导，使得排气侧水流方向距离冷却出口更近，达到冷却水流明显偏向排气侧的目的，优化后的缸盖冷却水腔具体结构见图 3。

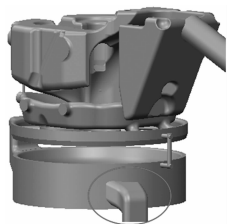


图 3 优化后的缸盖冷却水腔模型

2 数值分析

设计改进后，采用流固耦合数值仿真的方法，对冷却水腔和缸盖中的流动和换热情况进行数值模拟分析。

2.1 流动分析模型

任何流体的流动都遵守连续性方程，即 Navier-Stokes（纳维埃-斯托克斯）方程，当需要计算壁面的对流换热时还要补充能量方程。本文涉及的流体研究对象为冷却水正常工作时的稳态流场，它是不可压缩流体，需考虑质量守恒、动量守恒和能量守恒方程^[7-8]。

2.2 温度场分析模型

在长时间运行情况下，船用柴油机缸内处于较为稳定的稳态工况，燃气温度变化仅对缸套表面很薄的区域有影响，因此假设缸套温度分布为稳态温度场。

缸套内部可看做是无内热源的稳态温度场，求解温度场还需设定初始温度条件和边界温度或换热条件。常见温度边界条件分为三类：第一类边界条件：需规定边界的温度值；第二类边界条件：需规定边界上的热流密度值；第三类边界条件：需规定边界上物体与周围流体的表面传热系数及周围流体的温度。本文使用第三类边界条件，设定缸套初始温度均为 20℃；周围流体为与缸套接触的高温燃气、冷却水以及空气。

由于温度场有限元计算需要流体计算结果作为基础，需要将流动计算的结果投影到有限元网格上，该投影过程采用自编 Python 程序的方式实现。图 4 为优化后的冷却水腔流体仿真网格模型；图 5 为优化后的温度场有限元仿真网格模型。

3 计算结果

3.1 流动计算结果

图 6 为优化前后冷却水腔的流动情况对比。从图中可见：结构改进后可大幅增加排气侧缸套冷却水流动的均匀性，且在第一道活塞环处的冷却水流速大幅提高（框中所示）；同时进气侧的冷却水并没有明显减弱，在缸盖位置处的流动死区反而有一定的减小。这是因为优化前冷却水腔进口位置居中，这样虽然两侧的进水量比较均匀，但同时也造成了冷却水在缸套内旋转时，两侧水容易产生冲击碰撞，弱化了冷却效果。而优化后的结构虽然进气侧水量有一定的减少，但是由于冷却水在缸套的旋转趋势增强，在一定程度上弥补了水量减少的不

足,反而更利于水流的组织。同时,从表1可以看出,改进结构的冷却水压降并没有增加,反而减小了近4%,这进一步说明有目的的引导可以减少部分水流的碰撞与死区的形成,更有利于流动的组织与发展。



图4 优化后的冷却水腔流体仿真网格模型

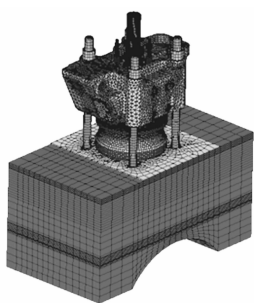


图5 优化后的温度场有限元仿真网格模型

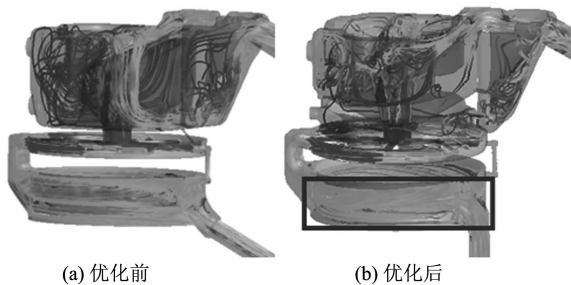


图6 优化前后缸套流动情况对比

表1 优化前后压降情况对比

冷却水腔	相对于优化前的压降变化率/%
优化前	0
优化后	-3.96

3.2 温度计算结果

图7和图8分别为优化前后缸盖位置的冷却水换热系数分布和剖面温度场。

从图7中可以看出:冷却水进口优化后,由于缸套位置流动性增强,导致缸盖位置处冷却水整体的流动均匀性和换热系数均得到大幅度提高,特别是排气侧的整体换热能力的提高更有利于改善排气侧的热负荷情况。图8中所示的缸盖剖面温度场也验证了这一结果,优化前排气阀座附近位置出现的部分受热集中区在优化后消失(框中所示),该区

域的温度下降幅度达到30℃左右,大幅度提高了缸盖工作可靠性。

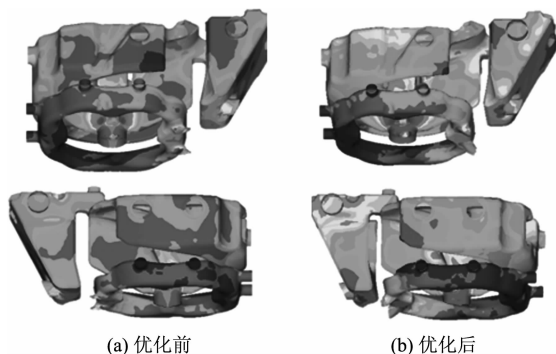


图7 优化前后缸盖换热系数对比

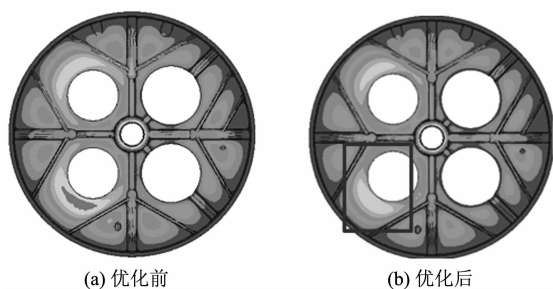


图8 优化前后缸盖剖面温度场结果对比

图9和图10分别为优化前后缸套位置的冷却水换热系数分布和缸套位置的剖面温度场。

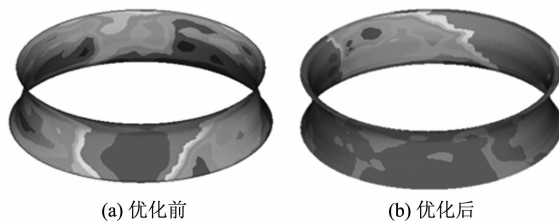


图9 优化前后缸套换热系数对比

从图9中可见,优化后缸套部位的换热系数整体有了大幅度提高,特别是整个排气侧区域换热能力和均匀性显著提高,这也从另一个角度验证了图6中流动分析的结果。

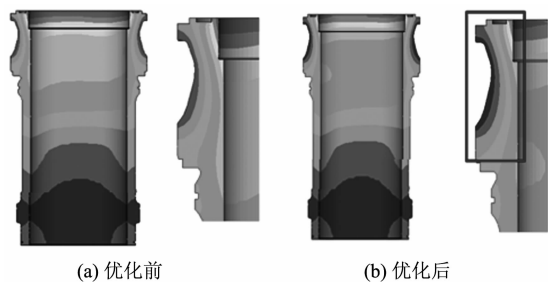


图10 优化前后缸套温度场纵剖面对比

从图10中可知,优化后缸套整体的温度分布更加均匀,整体幅值也有所下降。在缸套上部区

域,特别是排气侧的冷却幅值明显下降。在第一道活塞环附近,平均温度下降约 8℃ 左右,缸套的热负荷情况得到明显改善。

4 结 论

利用 CFD-FEA 温度场耦合计算方法,对冷却水腔结构优化前后的冷却水流动以及缸盖、缸套温度场分布进行了分析。分析表明:在结构布置允许的情况下,将缸套冷却水进水口向排气侧偏向布置并进行一定的引导,可在减小冷却水腔整体流动阻力的同时,有效改善冷却水整体流动情况,以及缸盖缸套等受热零部件的热负荷,达到提高缸盖、缸套工作可靠性的目的。

参考文献

- [1] 朱建元. 船舶柴油机 [M]. 北京: 人民交通出版社. 2008.
- [2] Kenji Okumura. CFD simulation by automatically generated tetrahedral and prismatic cells for engine intake duct

and coolant flow in three days [C]. SAE Paper 2000-01-0294.

- [3] Jacoby Pierre, Xu Henry, Wang David. VTG turbocharging—a valuable concept for traction application [C]. CIMAC, 2013, Paper No. 116.
- [4] M. Cardone, A. Senatore, D. Buono, et al. A model for application of Chen's boiling correlation to a standard engine cooling system [C]. SAE Paper 2008-01-1817.
- [5] 王希真, 严兆大, 周军. 柴油机缸套热负荷评估的分析及实验研究方法 [J]. 内燃机工程, 2001, 22 (2): 62-65.
- [6] 白敏丽, 吕继组, 丁铁新. 六缸车用内燃机冷却系的流动与传热仿真 [J]. 内燃机学报, 2004, 22 (6): 525-531.
- [7] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [8] FLUENT INT. USERS' GUIDE [R]. 2001.
- [9] ABAQUS INT. USERS' GUIDE [R]. 2008.

(上接第 19 页)

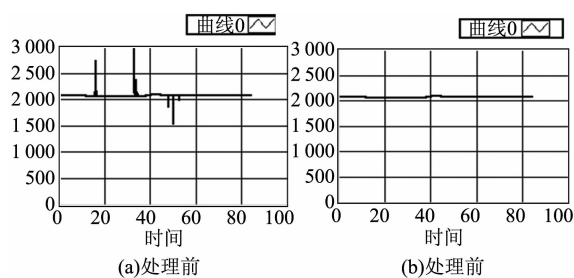


图 8 极值法处理前后转速波形图

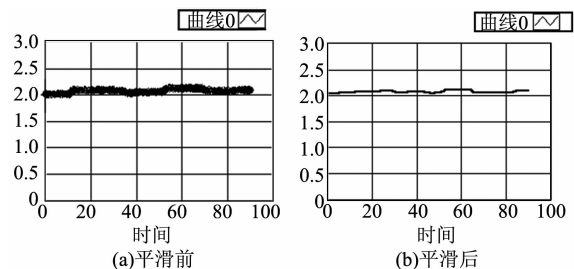


图 9 数据平滑前后燃油齿条波形图

4.2.2 数据回放

数据读取模块主要用于对当前采集的数据或历史数据进行回放,以便对其进行离线的处理和分析。信号的数据采集只能看到信号变化趋势,无法进行深层次的时域、频域分析,因此需将采集的数据记录下来,事后进行数据还原,在需要时重新观察和深入分析所采集的数据,重现柴油机运行中设

备当时的各种状态及特征,以深入分析不同时刻和工况下柴油机各部件工作状态。本项目使用 Labview 中的 TDMS 格式存储、回放数据。

5 总结

本文对试验室试车台柴油机运行状态监测系统进行了研究,基于 Labview 开发平台实现了对柴油机运行参数的采集、处理与分析,并通过时域、频域、幅域分析结果,提取特征参数,实现状态监测与报警。目前,本系统已成功应用于试验室试车台,采集数据完整、可靠,人机界面友好,具有良好的可移植性和可扩展性。该系统可推广应用至船舶柴油机运行状态远程在线监测、诊断与控制,为高性能船舶柴油机安全运行提供了技术保障。

参考文献

- [1] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [2] 陈越. 船用柴油机监控系统模块化设计技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [3] 李峰. 基于 CAN 总线和以太网的船舶机舱监测系统研究与设计 [D]. 山东: 山东大学, 2009.
- [4] 袁泉. 柴油机性能监测系统的开发与试验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.