

船用柴油机油底壳薄壁结构低噪声设计方法研究

闫超群¹, 王韶枫², 韩 霄¹, 王志刚¹, 宋怡欣¹

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 无锡齐耀华东隔振科技有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘 要: 船用柴油机油底壳尺寸大、壁厚薄, 导致其模态频率低、局部振动响应大。针对油底壳结构声学优化设计进行研究。首先建立了多目标优化函数, 将油底壳实测振动速度作为计算激励力输入, 对油底壳横截面、内部横隔板、纵隔板、角钢等进行结构优化设计。优化结果显示: 在油底壳部件尺寸不变的情况下, 其第一阶模态由 56.6 Hz 上升至 122.71 Hz; 振动速度响应由 $22.5 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ 降至 $10.5 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$, 显著改善了油底壳的刚度和振动响应特性。

关键词: 油底壳; 多目标优化函数; 结构; 振动响应; 优化

中图分类号: TK402 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)03-0032-04

Research on Low Noise Design Method for Thin-Walled Oil Sump Structure of Marine Diesel Engines

Yan Chaoqun¹, Wang Shaofeng², Han Xiao¹, Wang Zhigang¹, Song Yixin¹(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;
2. Wuxi Qiyao East China Vibration Isolation Technology Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214000)

Abstract: The oil sumps of marine diesel engines are usually large in size and thin in wall thickness, which often causes the problem of low modal frequency and large local vibration response. To solve this problem, optimization design was carried out on an oil sump aiming at its structural acoustics. A multi-objective optimization function was established, and the measured vibration velocity of oil sump was taken as the input of calculation excitation force. The structural optimization design of cross section, inner diaphragm, longitudinal diaphragm and angle steel of the oil sump was carried out. The results show that the first mode of the oil sump is raised from 56.6 Hz to 122.71 Hz, and the vibration speed response is reduced from $22.5 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ to $10.5 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ without changing the size of the oil sump, and the stiffness and vibration response characteristics of the oil pan are significantly improved.

Key words: oil sump; multi-objective optimization function; structure; vibration response; optimization

0 引 言

油底壳作为柴油机的典型薄壁构件, 其刚度低、面积大, 噪声辐射在整机辐射噪声中占比较大。因此, 对这类薄壁件的振动噪声控制对于降低内燃机噪声而言非常关键^[1]。一般对其进行拓扑优化、形状优化等结构优化, 优化后的油底壳振动

和噪声可得到一定程度地降低, 并可减少重复设计验证次数, 大幅缩短产品设计周期^[2-5]。

新型船用柴油机在研制过程中, 对尺寸、重量要求严格, 功率密度显著提升, 导致油底壳的薄壁特性突出; 同时, 对振动噪声指标要求也大幅提升, 多种因素互相影响, 给整机低噪声设计工作带来了很大挑战。油底壳作为整机振动能量分布较高

收稿日期: 2019-04-10

基金项目: 2017 年工业转型升级 (中国制造 2025) 资金 (Z135060009002)。

作者简介: 闫超群(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为轮机工程, 1063352157@qq.com。

的重要部件,也成为整机减振降噪设计的重点和难点。本文以提高该型柴油机油底壳模态频率,降低其振动速度响应(降低辐射噪声)为目标,通过结构优化多目标寻优,确定合理的油底壳低振动响应目标设计参数。

1 油底壳结构优化方法

优化设计包括三个要素:设计变量、目标函数、约束条件。其中:通过改变设计变量(如油底壳结构尺寸、形状等)来提高性能;目标函数要求最优的设计性能;约束条件是对设计变量和其他性能的要求,通过它来约束油底壳的重量、尺寸等。OptiStruct 优化过程中使用的数学模型为:

$$f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$g(X) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m$$

$$h_k(X) \leq 0 \quad k = 1, \dots, m_h$$

$$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \quad i = 1, \dots, h$$

其中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为设计变量; $f(X)$ 为设计目标; $g(X)$ 、 $h(X)$ 则是须要进行约束的设计响应。OptiStruct 采用数学规划方法,通过求解灵敏度构造近似显式模型,采用小步长迭代找到最优解。整个内部求解流程如图1所示。

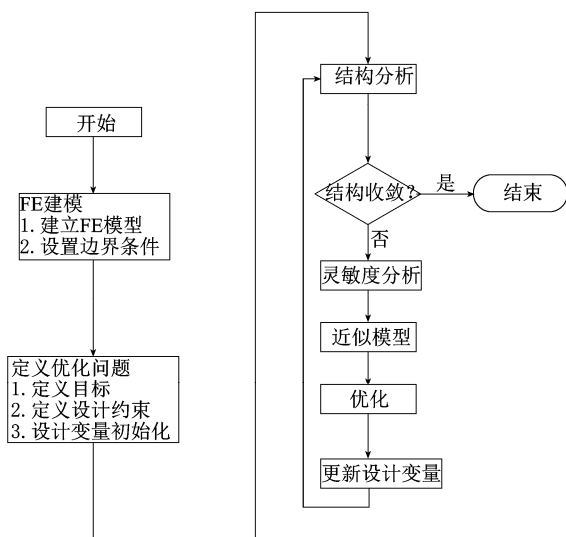


图1 OptiStruct 内部优化流程

2 油底壳结构优化过程

该油底壳为湿式、钢板焊接结构,具体结构形式如图2所示。分别在油底壳前端面(1#点)和右侧面(2#点)各取一测点,如图2所示,求取两个测点的振动速度响应均值,对比同位置优化前后振动速度响应均值。后续优化前后振动速度的对比都采用此法。为保证油底壳和机体安装的接口位

置不变,整个优化过程中,油底壳外形尺寸都作为约束条件,以保证其安装尺寸不变。



图2 油底壳原始结构和振动速度响应取点位置

2.1 油底壳横截面形状优化

现对油底壳进行形状优化,以横截面形状为设计变量;油底壳总质量不超过1300 kg为约束条件;提高第一阶固有频率10 Hz以上为目标函数。优化后横截面底边折弯角度为160°。优化前后横截面形状对比如图3所示。经计算,优化后油底壳质量增加30 kg,其第一阶模态频率提高12 Hz。优化前后油底壳前35阶模态频率对比如图4。

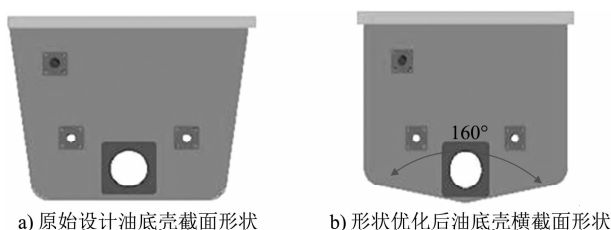


图3 原始设计与形状优化后油底壳横截面形状对比

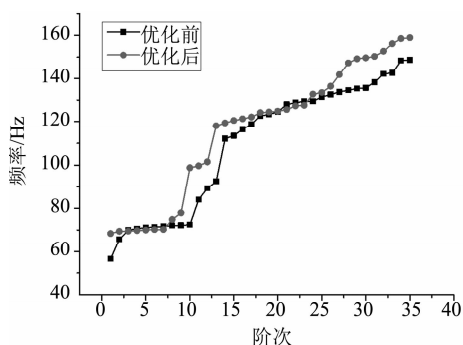


图4 优化前后油底壳模态频率对比

图5给出了优化前后的振动速度响应对比曲线,优化后的油底壳在0~200 Hz频段内振动速度响应显著降低,其中振动速度最大值由22.5 (mm·s⁻¹)降低为16.5 (mm·s⁻¹),最大降幅达到了26%。

2.2 油底壳内部横、纵隔板结构优化

在对油底壳横截面进行形状优化提高油底壳整体刚度后,对其内部横、纵隔板进行尺寸优化和形

状优化, 进一步提高油底壳整体和局部的刚度, 以达到提高油底壳模态频率和降低其振动速度响应目的。

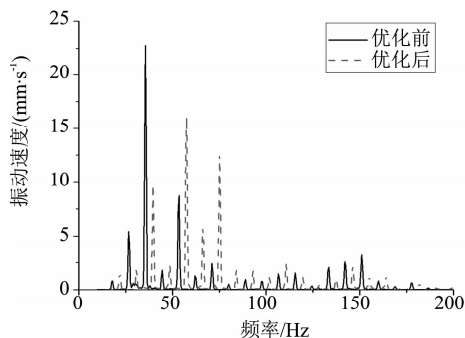


图 5 优化前后振动速度响应对比

(1) 内部隔板形状优化

优化前后油底壳内部隔板形式如图 6 所示, 隔板结构形式由平板式横结构优化为折弯横隔板和纵隔板相结合的结构形式。

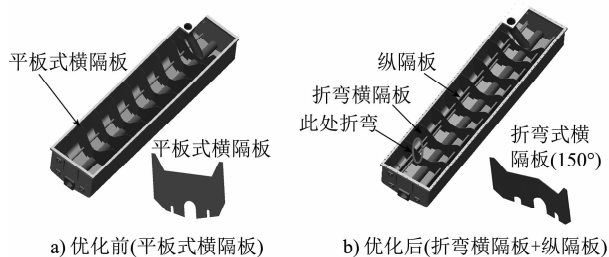


图 6 优化前后油底壳结构对比

经计算, 优化后油底壳质量无明显增加, 其第一阶模态频率提高 14 Hz, 160 Hz 内油底壳模态密度由 31 阶降为 24 阶, 模态密度的减少可降低其局部振动响应。优化前后油底壳 0 ~ 160 Hz 范围内模态频率对比如图 7 所示。

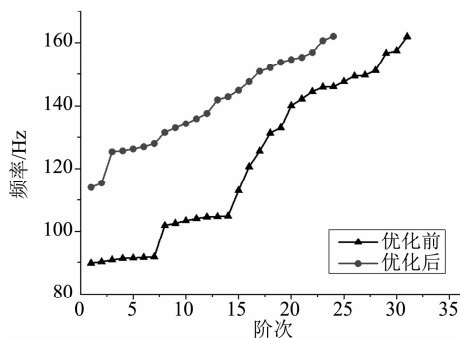


图 7 优化前后油底壳模态频率对比

在振动响应方面, 优化后的油底壳振动速度响应显著降低, 其中振动速度最大值由 $18.5 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ 降低为 $11.5 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$, 最大降幅达到了 40%, 优化前后对比如图 8 所示。

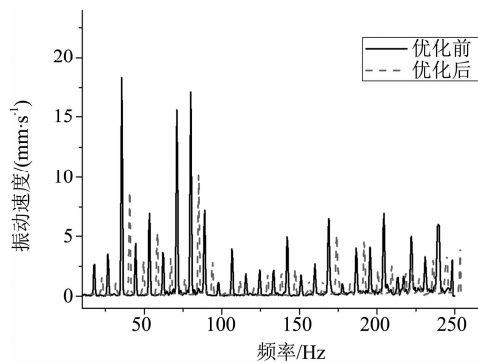


图 8 优化前后油底壳振动速度对比

(2) 内部隔板尺寸和形貌优化

将横隔板厚度由 6 mm 增加至 7 mm, 并将侧筋板加长, 同时增加角钢和矮纵隔板, 优化前后结构如图 9 所示。

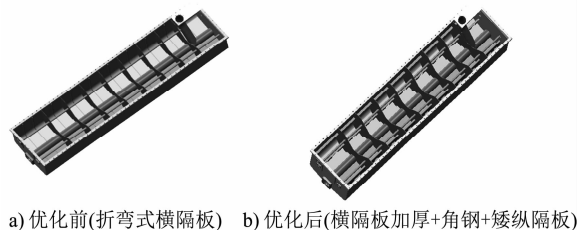


图 9 优化前后油底壳结构对比

经计算, 优化后油底壳质量增加 80 kg, 第一、二阶模态频率分别提高 6 Hz、12 Hz, 200 Hz 内油底壳模态密度由 25 阶降为 17 阶。优化前后油底壳 0 ~ 200 Hz 范围内模态频率对比如图 10 所示。

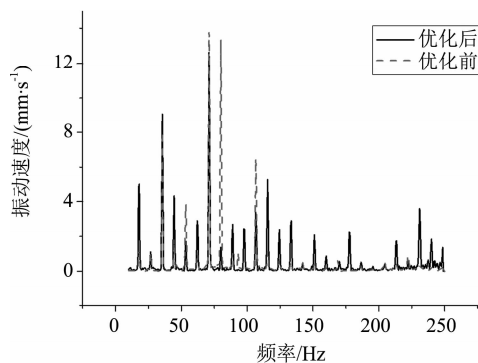


图 10 优化前后油底壳模态频率对比

在振动响应方面, 优化后的油底壳振动速度响应显著降低, 其中振动速度最大值由 $13.8 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ 降低为 $10.5 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$, 最大降幅达到了 40%, 优化前后对比如图 11 所示。

油底壳经过上述一系列的结构优化后, 在整体尺寸不变的情况下, 振动响应在整个频段都有一定程度降低。最终取得了油底壳第一阶模态由 56.6 Hz 提升至 122.71 Hz, 振动速度响应由 22.5

($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$) 降低至 $10.5 (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ 的良好效果。

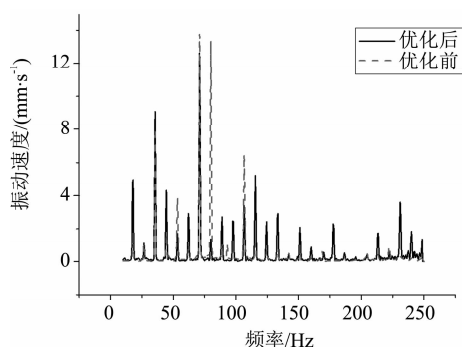


图 11 优化前后油底壳振动速度对比

3 结论

以船用大功率柴油机油底壳为研究对象,开展了薄壁结构的声学优化设计研究。以油底壳安装平面的振动响应试验数据作为实际激励输入,进行了油底壳多目标函数结构优化。整个优化过程中,保证油底壳安装接口不变,油底壳质量无显著增加。优化结果显示:油底壳固有频率明显提高,模态频率密度显著下降,表面振动速度响应大幅度降低。

(上接第 31 页)

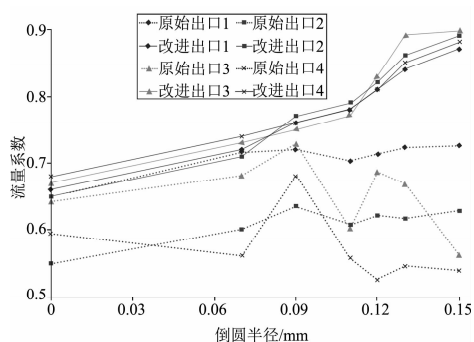


图 10 改进结构和原始结构各出口流量系数对比

对比原始结构和改进结构的流量系数,可以看到:改进结构在各倒圆半径下的出口流量系数均高于原始结构。随倒圆半径的增大,改进结构四个出口的流量系数均呈增大趋势。由流量系数的对比可知:改进结构流动特性要优于原始结构。表明结构改进是合理的。

3 结论

本文对某新型低速机喷嘴内部气液两相流体的流动过程进行了仿真分析,得到了不同倒圆半径下的出口流量系数和空穴分布情况。在此基础上对原始结构进行了改进,并得到如下结论:

(1) 原始结构出口流量系数为 $0.525 \sim 1 \sim$

表明:油底壳的低振动响应设计取得了良好的效果。根据试验测试数据:优化后的油底壳装机后,由于其局部振动的降低,使柴油机整机振动烈度降低了 1 dB 以上,对整机的振动噪声控制贡献显著。

参考文献

- [1] 王玉兴,郝志勇,陈馨蕊,等. 虚拟预测-形貌优化方法在油底壳低噪声设计中的应用研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31 (3): 80-84.
- [2] 贾维新,郝志勇,杨金才. 基于形貌优化的低噪声油底壳设计研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41 (5): 770-773.
- [3] 舒歌群,刘俊栋,李民,等. 基于 HyperWorks 的柴油机油底壳有限元建模和结构优化[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2008, 37 (1): 25-27.
- [4] 张俊红,王健,刘海,等. 基于多目标形貌优化方法的低噪声油底壳研究[J]. 振动、测试与诊断, 2014 (3): 467-472.
- [5] 方子帆,杨磊,杜道佳,等. 支撑结构多目标拓扑优化设计研究[J]. 中国机械工程, 2010 (15): 1836-1839.

0.729 9;随倒圆半径增大,出口流量系数波动较大;各倒圆半径下均存在空穴,主要分布在倒圆区域和喷孔出口处。

(2) 对原始结构进行改进,主要是增大流体流动区域。结果表明:随倒圆半径的增大,改进结构四个出口的流量系数均呈增大趋势;出口流量系数为 $0.650 \sim 0.892$ 。由流量系数的对比可知:改进结构四个出口的流量系数一致性较好,且各倒圆半径下流量系数均高于原始结构。表明对结构的改进是合理的。

参考文献

- [1] 杜兵,谢远文,肖朝南,等. 喷油嘴偶件关键特性参数对燃油系统喷射特性的影响[J]. 舰船科学技术, 2010, 32 (8): 75-80.
- [2] BLESSING M, KONG G, KRUGER C, et al. Analysis of flow and cavitation phenomena in diesel injection nozzles and its effects on spray and mixture formation [C]. SAE Paper, 2003-01-1358, 2003.
- [3] SCHMIDT D P. Cavitation in diesel fuel injector nozzles [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1997.
- [4] 何志霞,李德桃,胡林峰,等. 喷油嘴喷孔内部空穴两相流动数值模拟分析[J]. 内燃机学报, 2004, 22 (5): 433-438.
- [5] 胡林峰,夏兴兰,郭立新. 喷油嘴偶件内部流动特性的研究[J]. 现代车用动力, 2009 (4): 7-13.