

基于动态特性分析的油底壳结构优化

丁建军^{1,2}, 蒋 吕², 姚玉洁², 王舒楠^{1,2}

¹船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海

²中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 上海

Email: 395004154@qq.com

收稿日期: 2021年3月4日; 录用日期: 2021年4月15日; 发布日期: 2021年4月22日

摘 要

通过有限元法对目标柴油机油底壳进行模态分析, 掌握其结构动态特性, 确保油底壳的固有频率避开柴油机的激励频率。计及油底壳内部油液质量的影响, 采用声固耦合法评估了带油液的油底壳的振动特性。结果显示内部油液质量会导致结构固有频率明显降低, 一阶模态频率降幅达41.5%, 证明在油底壳设计分析中内部油液的重量不能忽视。本文提出五种优化方案对油底壳进行优化设计, 通过油底壳湿模态计算结果对比, 证明增加筋板为最佳优化方案, 并对最优方案模型进行振动响应计算, 验证优化后油底壳的振动响应比原模型有大幅降低。

关键词

油底壳, 动态特性分析, 油液, 频率

Structural Optimization of Oil Pan Based on Modal Analysis

Jianjun Ding^{1,2}, Lv Jiang², Yujie Yao², Shunan Wang^{1,2}

¹National Engineering Laboratory for Naval Architecture and Ocean Power Systems, Shanghai

²Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai

Email: 395004154@qq.com

Received: Mar. 4th, 2021; accepted: Apr. 15th, 2021; published: Apr. 22nd, 2021

Abstract

Modal analysis of oil pan of diesel engine is carried out by finite element method to ensure that the frequencies are away from the excitation frequency of diesel engine. The vibration characteristics of the oil pan with oil were evaluated by using the sound-structure coupling method, considering the influence of the oil inside the oil pan under working condition. The results show that the frequencies of the oil pan with oil inside are significantly lower than those of the dry mode, and the

frequency of the first mode is reduced by 41.5%, which indicates that the oil cannot be ignored in the design and analysis. In this paper, five structural optimization schemes are proposed to optimize the oil pan. By comparing the results of dynamic characteristics analysis, it is proved that the reinforcement plate is the best optimization scheme. The vibration response calculation of the optimization model is carried out to verify that the vibration response of the oil pan after optimization is significantly reduced compared with the original model.

Keywords

Oil Pan, Modal Analysis, Oil, Frequency

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

柴油机经常被用作船舶的主动力设备和发电设备,是船舶动力系统和发电系统的重要组成部分之一。柴油机以其显著的经济性决定了其在推进和发电系统的不可代替性,但是其明显的缺点是柴油机的振动噪声会给机舱和附近舱室的带来舒适性的降低。因此,关于柴油机的振动和噪声控制一直都是设计人员的研究重点。

油底壳是柴油机辐射噪声贡献量的主要部件之一,占柴油机整机的 20%左右[1]。只要能对油底壳的辐射噪声水平有所抑制,就能在整机的振动噪声控制效果上有明显提升,相对于优化柴油机机体结构和缸内燃烧过程,优化油底壳结构是可操作性很强的手段。研究表明[2] [3]提高油底壳结构的整体刚度,有利于振动噪声控制,从而实现柴油机整机振动噪声的降低。

本文采用通用有限元软件对船用柴油机油底壳进行动态性能分析,并基于声固耦合考虑内部油液对油底壳的动态特性的影响,并以提高油底壳刚度为设计目标对油底壳进行结构优化,分析油底壳的动态特性,选取油底壳结构优化方案。

2. 油底壳模型

开展油底壳的动态特性分析,可以检验油底壳的设计方案是否满足固有频率避开柴油机的激励频率的要求,避免引起共振的风险。

在设计软件中对油底壳进行几何建模,为提高计算效率,对油底壳多余部件和几何特征进行简化,以便得到高质量的结构网格。由于油底壳是薄壳结构,在 HyperMesh 处理结构的时候对实体进行抽壳处理,采用平面单元进行网格划分,最后得到计算模型如图 1 所示,材料参数如表 1 所示。

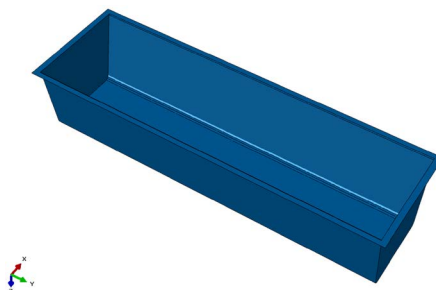


Figure 1. Oil pan model
图 1. 油底壳模型

Table 1. Material parameters
表 1. 材料性能参数

材料	Q235
密度	7800 kg/m ³
弹性模量	2.1e11 Pa
泊松比	0.3
板厚	5 mm

计算结果显示, 未考虑油底壳内部油液的情况下, 原设计方案一阶模态频率为 108 Hz, 避开了柴油机的主要激励频率 73.3 Hz。

3. 考虑含油液的油底壳动态特性分析

文献[4]针对油底壳的不同含油量进行对比分析, 发现内部油液的质量对油底壳模态计算结果影响很大, 其质量增加会降低模态频率。还有学者将油液质量以质量等效的方式加到油底壳结构上, 也证明了油液质量会明显降低油底壳的固有频率。冯威等为了精确考虑油液的影响程度, 采用流固耦合法分析带油液的油底壳, 并通过试验验证了计算方法[5]。

为了考虑流体对结构振动特性的影响, 本文采用计算效率更高的声固耦合法模拟流体特性。将油底壳内流体当作声学单元, 模拟流固耦合问题。本文假定油底壳工作状态器内部油液占容量的 50%, 油液密度取 900 kg/m³, 进行考虑油液的动态特性分析, 考虑油液的油底壳计算模型如图 2 所示。

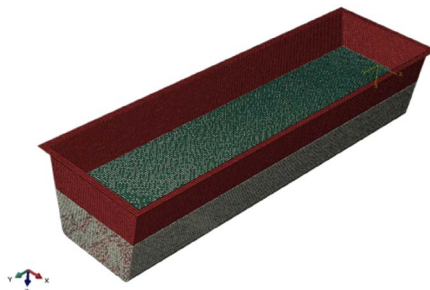


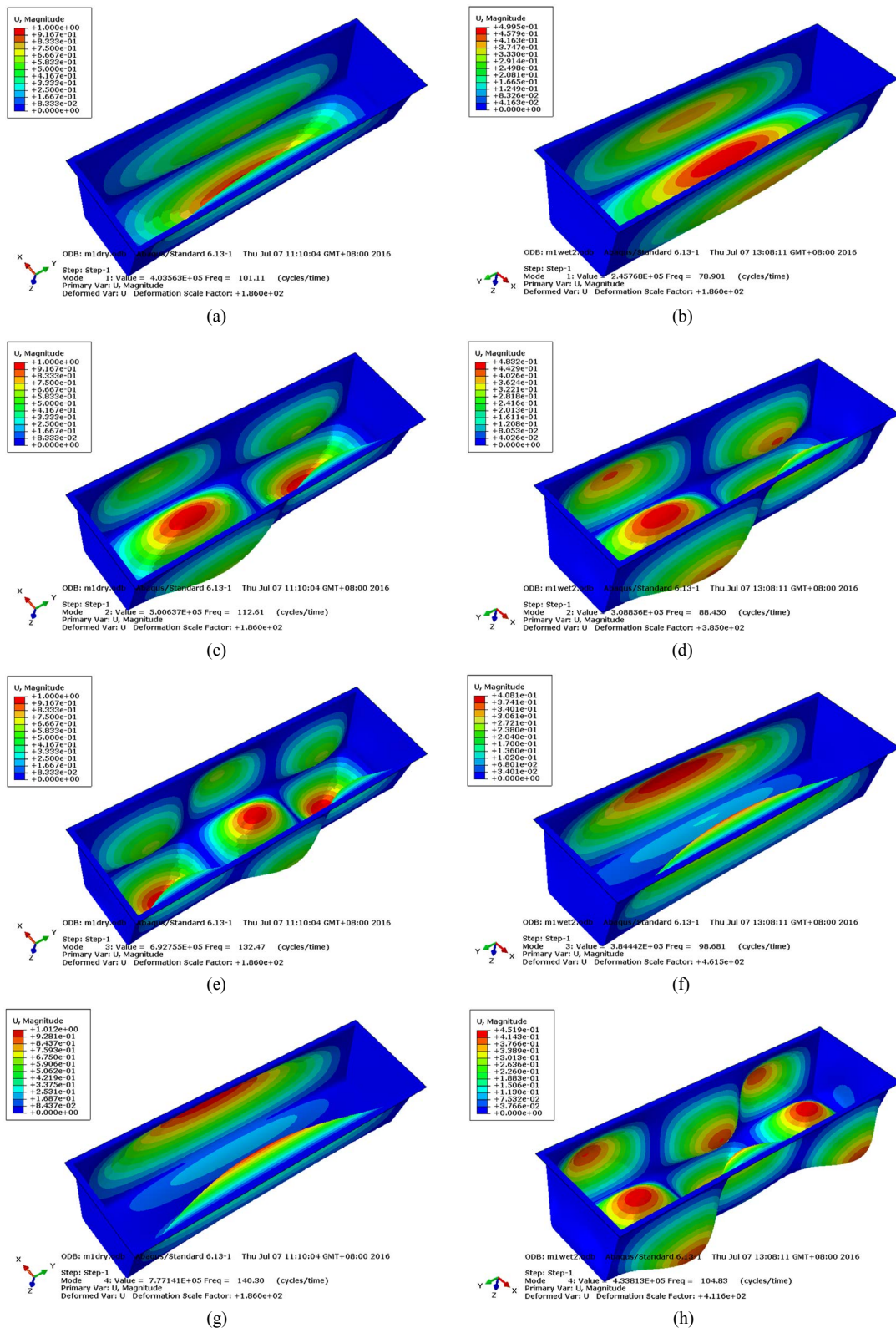
Figure 2. Analysis model of oil pan considering liquid
图 2. 考虑油液的油底壳计算模型

如表 2 所示, 在计算模型中计及油底壳内部油液质量之后, 油底壳的各阶频率降低 20%以上, 尤其是第一阶频率降低至 78.9 Hz, 与激励频率接近, 增加了共振的风险。

Table 2. First six modes of oil pan
表 2. 油底壳前六阶模态

序号	频率/Hz		
	干模态	湿模态	下降比例
1	101.1	78.9	22.0%
2	112.6	88.5	21.5%
3	132.5	98.7	25.5%
4	140.3	104.8	25.3%
5	151.7	109.3	28.0%
6	160.5	122.5	23.7%

从图 3 的模态振型对比可以看出, 油底壳内部油液不仅使得模态频率降低, 还引起了部分模态振型的改变, 使得油底壳的板壳结构呈现出更多的低阶振型。



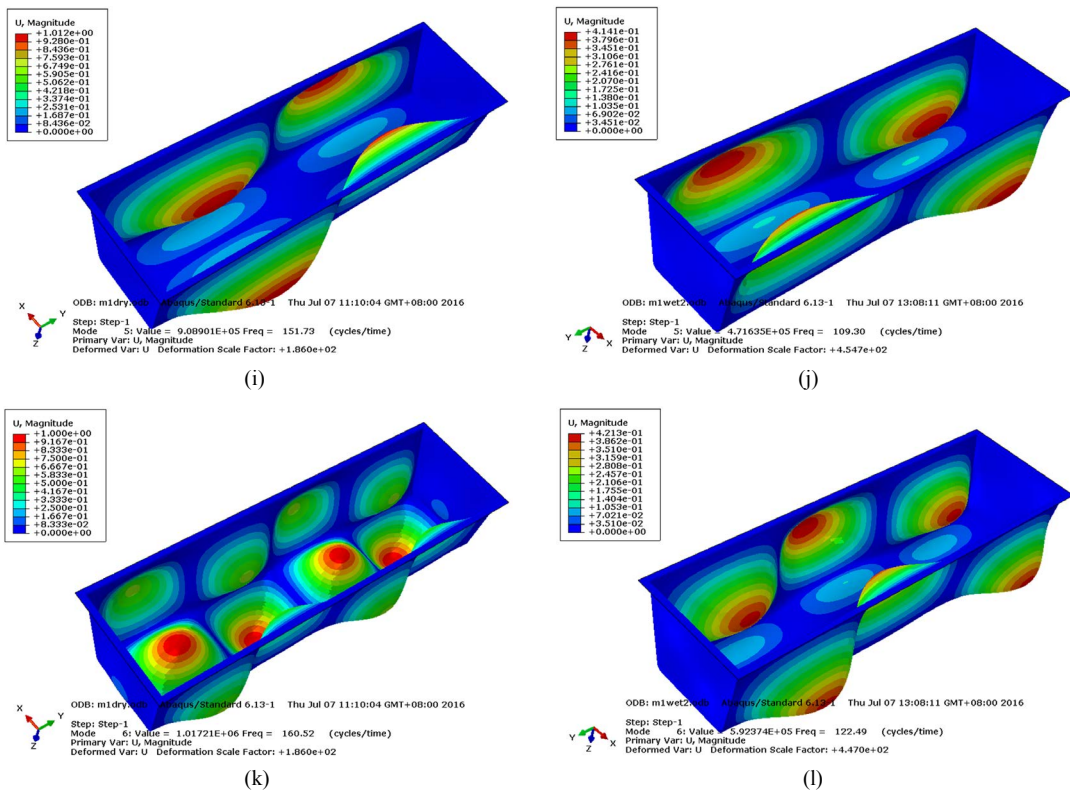
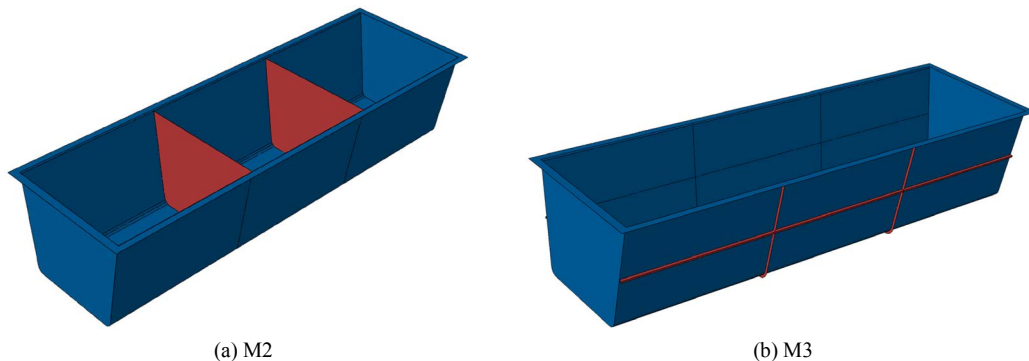


Figure 3. Comparison of vibration modes of oil pan. (a) First dry mode; (b) First wet mode; (c) Second dry mode; (d) Second wet mode; (e) The third dry mode; (f) The third wet mode; (g) The fourth dry mode; (h) The fourth wet mode; (i) The fifth dry mode; (j) The fifth wet mode; (k) The sixth dry mode; (l) The sixth wet mode

图 3. 油底壳模态振型对比。(a) 干模态(第一阶); (b) 湿模态(第一阶); (c) 干模态(第二阶); (d) 湿模态(第二阶); (e) 干模态(第三阶); (f) 湿模态(第三阶); (g) 干模态(第四阶); (h) 湿模态(第四阶); (i) 干模态(第五阶); (j) 湿模态(第五阶); (k) 干模态(第六阶); (l) 湿模态(第六阶)

4. 油底壳的结构优化

考虑油液质量后油底壳的模态频率降低，所以需要提高油底壳的低阶模态频率，避免共振的风险。针对油底壳的结构优化，提高其结构刚度可以有效提高油底壳的固有频率，增加油底壳的刚度对其柴油机的辐射噪声抑制也有显著的效果[6]。本文提出了 5 种油底壳优化设计方案，分别是：方案 1，将原方案的所有板厚增加 1 mm；方案 2 在油底壳内部增加两块板厚 5 mm 的横隔板；方案 3 在油底壳外侧增加 10 × 5 mm 的型材；方案 4 在油底壳内部增加五块板厚 3 mm 的横隔板；方案 5 在油底壳增加五块板厚 4 mm 的 80% 高度横隔板。4 种结构优化的模型如图 4 所示。



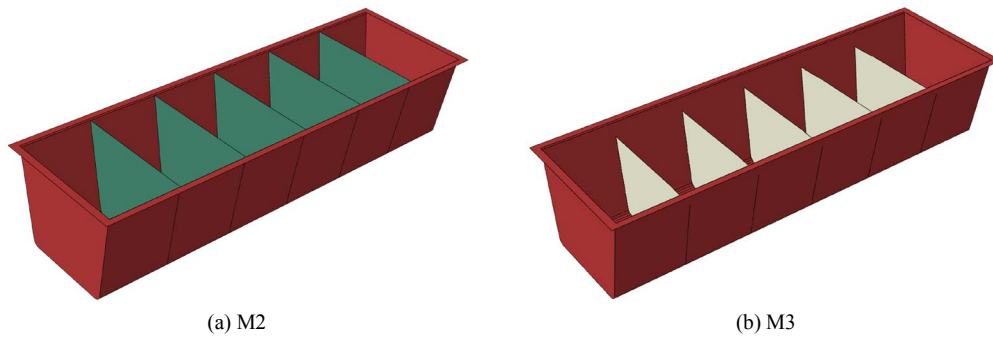


Figure 4. Model of optimization schemes
图 4. 结构优化模型

对应于结构设计更改，优化后模型重量比原模型有所增加，具体如表 3 所示。

Table 3. Description of optimization schemes
表 3. 优化方案对比

油底壳方案	质量增加(%)	备注
M1	20.0	板厚增加 1 mm
M2	11.3	增加两块板厚 5 mm 的横隔板
M3	3.6	外侧增加 10 × 3 mm 的加强筋
M4	17.4	增加五块板厚 3 mm 的横隔板
M5	19.4	增加五块板厚 4 mm 的 80%高度横隔板

分别建立五种方案的计算模型，同样考虑油底壳内部含油量 50%，分析得到三种模型的前六阶模态频率如表 4 所示。

Table 4. Optimization scheme
表 4. 油底壳模态结果

Mode	频率/Hz				
	M1	M2	M3	M4	M5
1	98.0	47.7	109.4	73.9	101.9
2	109.6	75.6	116.9	74.2	102.8
3	124.5	75.7	128.0	74.5	104.0
4	129.6	84.2	156.3	74.8	104.8
5	136.2	107.4	163.6	78.1	110.1
6	152.5	109.6	175.4	158.1	162.7

图 5 为五种优化方案模态计算结果与原模型计算结果对比图。经过对五种方案的模态频率对比和振型图分析，发现方案 1 模型通过对板厚的增加，使得油底壳的刚度有所提高，其一阶频率从 78.9 Hz 提高到 98.0 Hz，增幅达到 24.2%；方案 2 模型在油底壳增加隔板，不仅没有提高第一阶固有频率，反而在 75 Hz 附近还存在多个频率；方案 3 模型计算结果一阶模态频率从 78.9 Hz 提高到 109.4 Hz，增幅达到 38.7%；方案 4 通过横隔板的数量增加，与方案 2 一样引入了隔板自身的局部振动模态，降低了一阶固有频率；方案 5 由于横隔板高度降低，避免了横隔板自身低频模态，实现了一阶固有频率提高 29.3%。

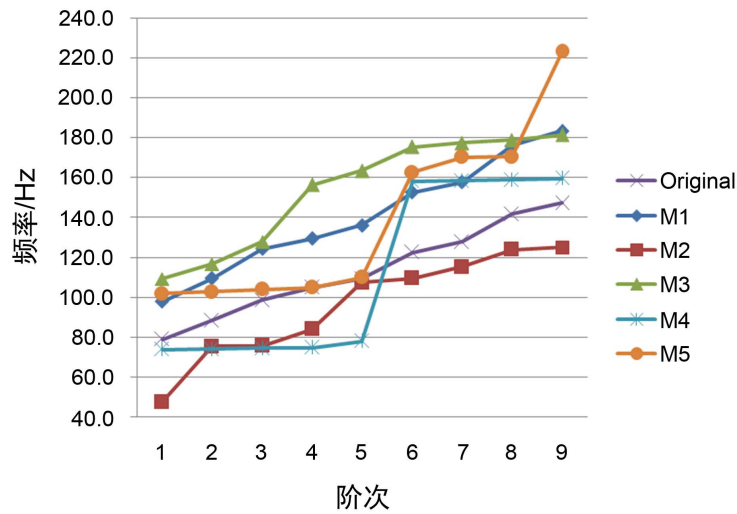


Figure 5. Comparison of modal frequencies
图 5. 优化方案频率对比

如图 6 所示, 方案 1、方案 3 和方案 5 优化后油底壳湿模态的一阶固有频率都有所提高, 避开激励频率 73.3 Hz。方案 2 和方案 4 增加横向隔板, 虽然使得油底壳整体一阶模态频率提高, 但是由于横隔板刚度较小, 引入了自身局部模态, 反而使得油底壳的第一阶模态频率降低。相比之下方案 3 是最优方案, 在油底壳底部和侧面板增加型材, 使得油底壳的一阶频率提高 38.7%, 仅以质量增加 3.6%的成本实现油底壳的一阶固有频率大幅提高, 完全避开柴油机的激励频率。

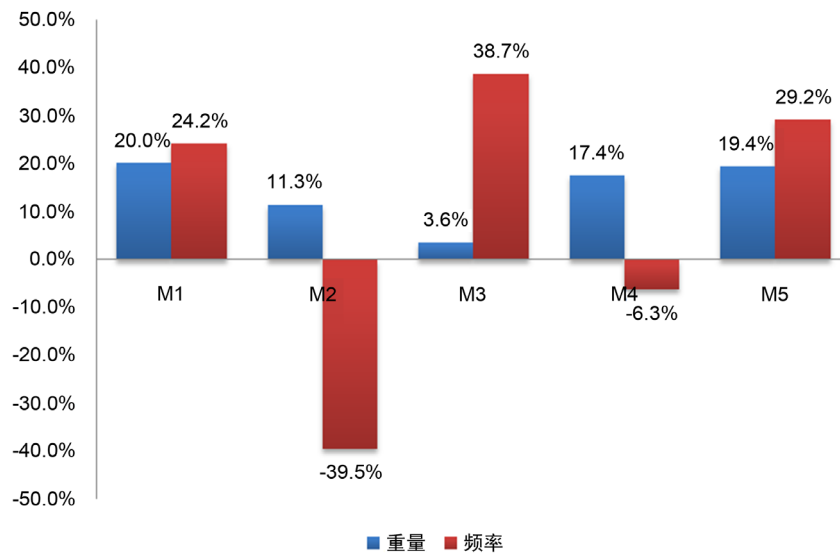


Figure 6. Comparison of first order frequency of each optimization scheme
图 6. 各优化方案一阶频率对比

5. 油底壳响应分析

对最优方案 3 进行振动响应分析, 对比优化后的模型在额定激励下的响应优化。对油底壳进行振动仿真分析, 方案 3 和原方案相同部位的振动加速度对比如图 7 和图 8 所示。图 7 为油底壳在白噪声激励下的振动响应, 图 8 为施加的柴油机机脚振动激励后油底壳的振动响应。

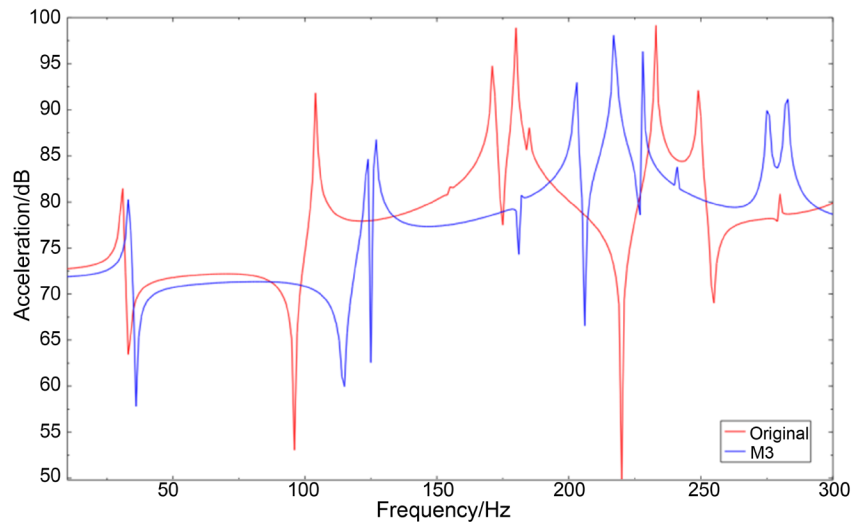


Figure 7. Comparison of vibration response of oil pan under white noise
图 7. 标准激励下油底壳振动响应对比

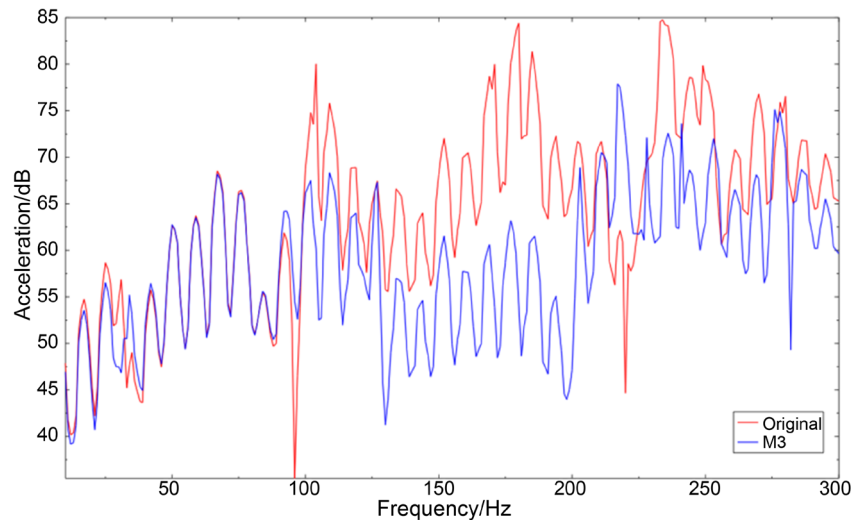


Figure 8. Comparison of vibration response of oil pan excited by diesel engine
图 8. 优化前后油底壳振动加速度对比

在白噪声激励作用下, 优化后模型的振动响应比原始模型的振动响应峰值稍小, 频率靠右偏移。如图 8 所示, 柴油机激励下, 油底壳的振动响应与模态计算结果呈明显的相关特性, 在 100 Hz 到 200 Hz 频段油底壳的刚度增大, 其响应降低。在 10~300 Hz 内, 原始模型的振动响应总值 118.0 dB, 优化后方案 3 模型油底壳振动响应总值 100.8 dB, 降低 17.2 dB。

6. 结论

本文以柴油机油底壳为研究对象, 基于声固耦合法考虑内部油液质量的影响, 分析油底壳的动态特性。为了提高油底壳的一阶固有频率, 提出了五种油底壳优化方案, 通过其动态特性分析对比确定优化方案 3 为最佳方案, 并开展振动响应预估, 得到如下结论:

1) 增加筋板是良好的结构优化方式, 在有限增加质量的前提下, 能显著提高油底壳的低阶固有频率, 有助于避开柴油机的主要激励频率, 降低共振的风险。

2) 油底壳内部含油量 50%，其油液的质量效应会大幅降低油底壳的固有频率，设计分析时内部油液的重量不能忽视。

3) 油底壳振动响应受结构强度影响较大，经过优化后的油底壳固有频率增大，频率特性改变，其振动加速度响应比原模型降低 17.2 dB。

参考文献

- [1] 张海娟. 发动机油底壳振动与噪声辐射研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [2] 王奇文, 郝志勇. 发动机油底壳的低噪声结构设计[J]. 振动与噪声控制, 2012, 32(3): 90-93.
- [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]. 小型内燃机与摩托车, 2008, 37(1): 25-27.
- [4] 郭昂, 于洪亮, 宋玉超. 油液对油底壳模态的影响分析[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(1): 118-123.
- [5] 冯威, 袁兆成, 刘伟哲. 用液固耦合方法研究柴油机油底壳辐射声场[J]. 内燃机学报, 2005, 23(6): 536-540.
- [6] 闫超群, 王韶枫, 韩霄, 等. 船用柴油机油底壳薄壁结构低噪声设计方法研究[J]. 柴油机, 2019, 41(3): 32-35.