

# 基于ABAQUS某汽车空气滤清器的模态分析及结构优化

黄盛举, 王 艳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2021年12月19日; 录用日期: 2022年2月17日; 发布日期: 2022年2月25日

---

## 摘 要

汽车空气滤清器是汽车进气系统的重要零件, 其在工作过程中由于受到汽车发动机的激励以及汽车行驶过程中所产生的振动会影响空气滤清器的寿命, 导致其破坏和疲劳失效。为研究某汽车空气滤清器的振动特性, 首先, 本文在三维软件SolidWorks中建立了空气滤清器的三维模型。然后, 基于有限元方法, 将其导入仿真软件ABAQUS中进行约束模态分析, 对空气滤清器的固有频率和振型进行了详细分析及讨论。最后, 在保证空气滤清器性能参数不变的前提下, 对现有的空气滤清器提出3种结构优化方法并进行分析。为进一步解决现有空气滤清器振动问题提供理论基础, 为空气滤清器的结构改进方向提供参考。

## 关键词

空气滤清器, ABAQUS, 模态分析, 固有频率, 优化设计

---

# Modal Analysis and Structural Optimization of a Car Air Filter Based on ABAQUS

Shengju Huang, Yan Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 19<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2022; published: Feb. 25<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

Automobile air filter is an important part of automobile intake system. It will affect the service life of air filter and lead to damage and fatigue failure due to the excitation of automobile engine and

the vibration generated during automobile driving. In order to study the vibration characteristics of an automobile air filter, firstly, establish the three-dimensional model of the air filter in the three-dimensional software SolidWorks. Then, it is imported into the finite element simulation software ABAQUS for constrained modal analysis based on the finite element method, and the natural frequency and vibration mode of the air filter are analyzed and discussed in detail. Finally, on the premise of keeping the performance parameters of the air filter unchanged, three structural optimization methods for the existing air filter are proposed and analyzed. It provides a theoretical basis for further solving the vibration problem of the existing air filter and provides a reference for the structural improvement direction of the air filter.

## Keywords

Air Filter, ABAQUS, Modal Analysis, Natural Frequency, Optimal Design

Copyright © 2022 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

空气滤清器受到发动机的激励以及高速气流的影响, 导致辐射噪声的产生, 噪声的产生容易导致空气滤清器发生共振作用导致疲劳破坏, 使其报废[1] [2]。关英俊等人[3]在有限元仿真软件中建立了空气滤清器的有限元模型, 并对其进行了模态分析和结构优化。刘士军等人[4]针对当前汽车部件中的空气滤清器结构, 构建有限元模型并分析, 从而获得汽车空气滤清器的刚度数值, 并进行了相应分析。张宇等人[5]以某空气滤清器为研究对象, 基于有限元方法并结合空气滤清器的实际工况进行振动疲劳分析, 并进行了试验验证。栾宝奇等人[6]通过机车空气滤清器整机试验台的研发, 改进试验方法和试验装置, 并阐述了不同试验方法对试验结果的影响。

综合上述分析, 对空气滤清器的振动特性和优化方法有仿真分析法和试验法。本文基于有限元仿真软件 Abaqus 对某车型空气滤清器进行振动特性分析, 得到空气滤清器模态分析结果。考虑到空气滤清器的工作状况, 以提高其固有频率为目的, 对现有的结构进行优化设计, 避免与外部激振作用发生共振, 提高空气滤清器的工作性能和系统的稳定性。

## 2. 空气滤清器几何模型建立

本文以某汽车的空气滤清器作为分析对象, 首先, 根据空气滤清器的实物模型在 SolidWorks 中创建三维模型, 之后导入 Abaqus 仿真软件, 通过网格划分、添加约束及边界条件后进行振动特性分析。图 1 所示为本文空气滤清器的三维模型, 模型主要包括壳体, 滤芯, 垫圈, 端盖几个部分。其材料为 PP + TD40 塑料材质, 弹性模量为 2450 MPa, 密度为 1220 kg/m<sup>3</sup>, 泊松比为 0.41 [3]。

## 3. 空气滤清器模态分析

### 3.1. 模态分析概述

模态分析作为一种重要的故障检测和结构分析方法, 应用在各大领域, 是工程实践设计过程中的重要一环[7]。模态分析可分为自由和约束模态分析两种, 实质上, 模态是系统的固有属性, 只由其材料自身属性和结构决定, 与外部激励等其他因素并无关系。

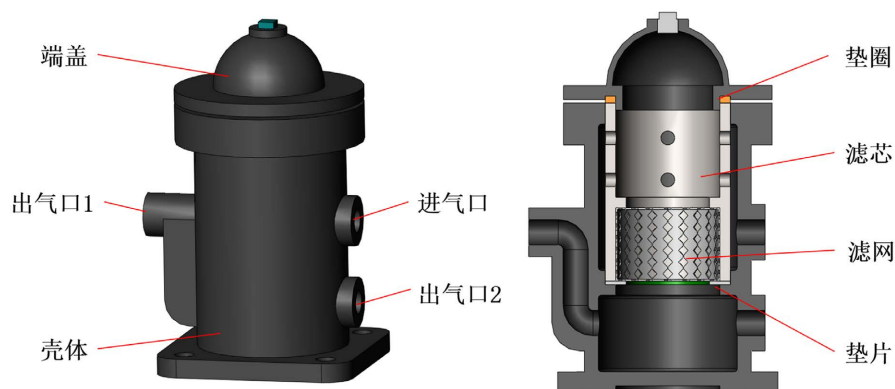


Figure 1. 3D model of air filter  
图 1. 空气滤清器三维模型

对任意一个系统, 其结构的振动微分方程为:

$$[M]\{x(t)''\} + [C]\{x(t)'\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中,  $[M]$  为系统质量矩阵,  $[C]$  为系统阻尼矩阵,  $[K]$  为系统刚度矩阵;  $F(t)$  为外部激励载荷矩阵;  $x(t)$  为系统各点的广义向量。

空气滤清器在忽略阻尼的情况下, 系统的自由振动微分方程可表示为:

$$[M]\{x(t)''\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (2)$$

根据公式求解可得该空气滤清器的各阶固有频率及振型。

## 3.2. 模态分析

### 3.2.1. 模型的建立和网格的划分

同一系统的动态特性会随着约束方式的变化而变化, 因此, 为了保证仿真的真实性及准确性, 在对系统进行模态分析前需要分析系统的约束。考虑到本文滤清器的安装方式, 可以得到该滤清器有三处约束, 分别是两个出气口与汽车其他部件的连接约束、壳体底座与汽车的连接约束, 如图 2 所示。

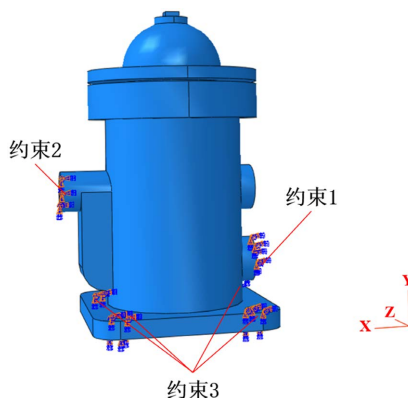


Figure 2. Three restraint positions of air filter structure  
图 2. 空气滤清器结构的三处约束位置

在 Abaqus 中利用网格划分模块对滤清器结构的整个计算域进行网格划分。网格划分的精度和质量会

对模态分析结果产生较大影响, 网格的不规则会导致仿真结果误差较大, 同时本文考虑到仿真计算时圆角结构对模态分析的影响, 将网格划分四面体网格, 网格单元类型为 C3D10, 网格单元数和节点数分别为 201,304 及 314,105, 如图 3 所示。

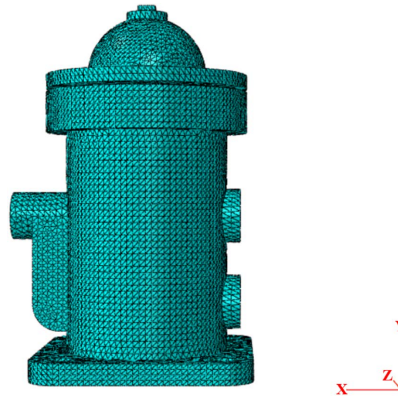
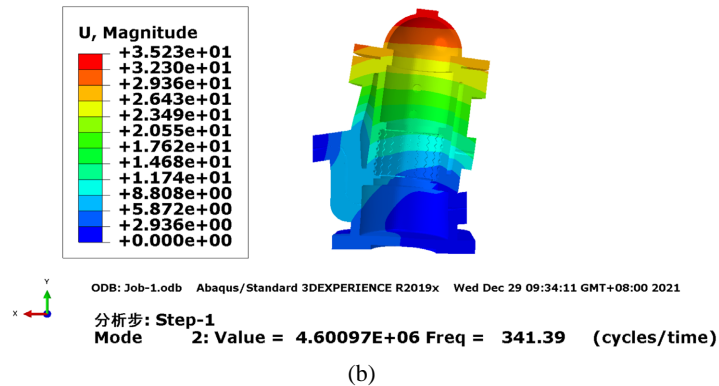
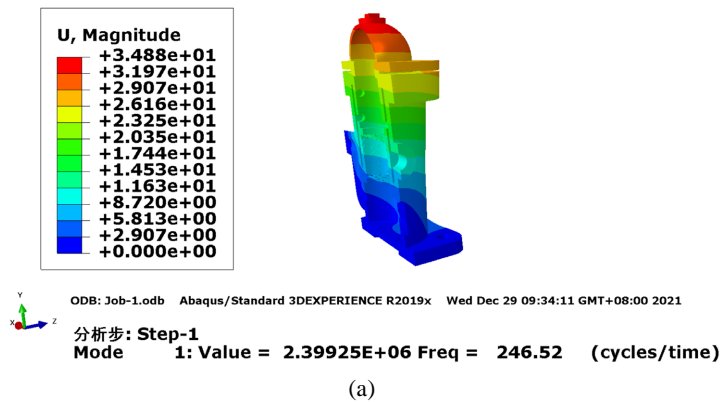
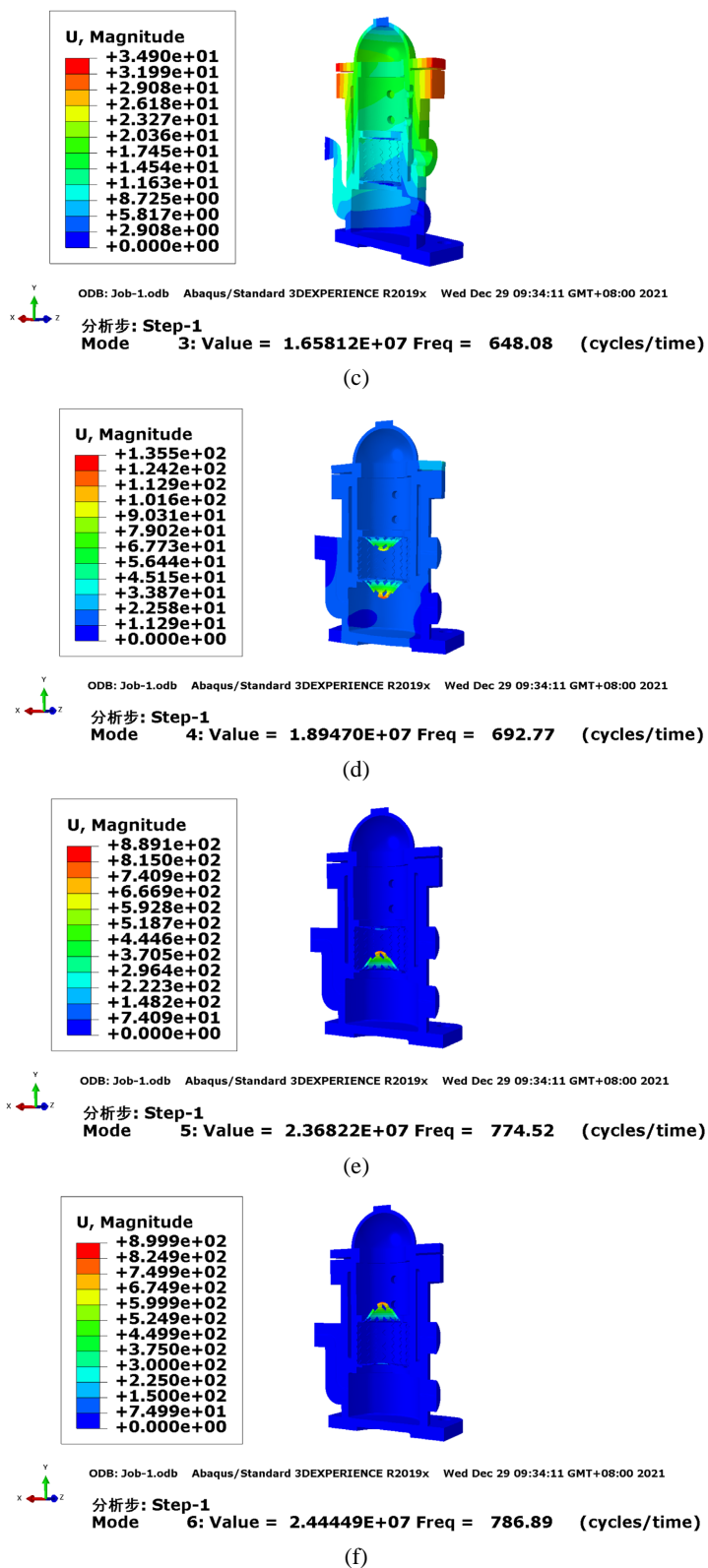


Figure 3. Air filter structure meshing  
图 3. 空气滤清器结构网格划分

### 3.2.2. 模态分析结果

根据机械振动理论可知, 任意系统都具有无限阶的固有频率, 但工程实践中影响系统稳定性的只有前几阶固有频率[8]。所以, 本文在有限元软件中只分析空气滤清器的前 6 阶固有频率和振型。下图 4 为空气滤清器的前 6 阶振型图, 由图 4 可知每一阶的共振部分和振型变形量的大小是不同的; 由于两出气口和壳体底座有约束, 因此其周边没有出现较大的振幅, 这于空气滤清器的正常工况相符合。





**Figure 4.** The first 6-order mode of the air filter. (a) The 1 vibration mode; (b) The 2 vibration mode; (c) The 3 vibration mode; (d) The 4 vibration mode; (e) The 5 vibration mode; (f) The 6 vibration mode

**图 4.** 空气滤清器前 6 阶振型图。(a) 1 阶振型; (b) 2 阶振型; (c) 3 阶振型; (d) 4 阶振型; (e) 5 阶振型; (f) 6 阶振型

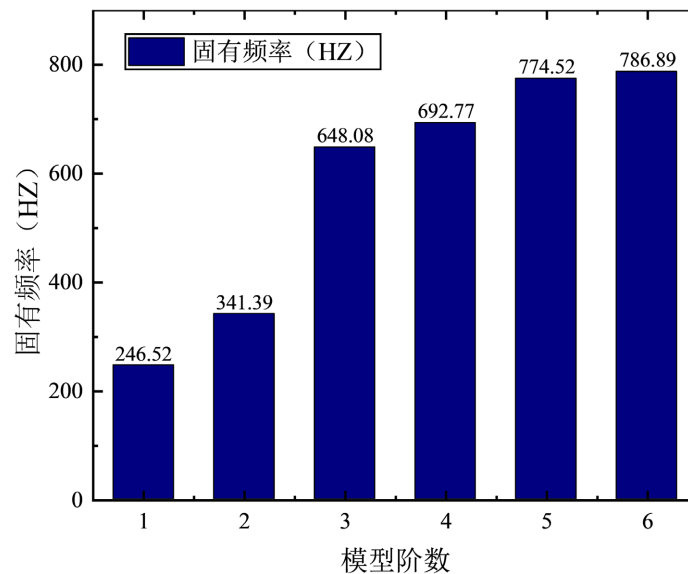
由上图 4 可得空气滤清器的前 6 阶固有频率值, 如下表 1 所示。由表 1 可知, 空气滤清器在约束条件下从 1 阶至 6 阶固有频率大小为 246.52~786.89 Hz。

**Table 1.** The first 6-order natural frequency and mode characteristics of air filter

**表 1.** 空气滤清器前 6 阶固有频率和振型特征

阶数	固有频率(Hz)	振型特征
1	246.52	空气滤清器整体绕 X 轴顺时针扭转
2	341.39	空气滤清器整体绕 Z 轴顺时针扭转
3	648.08	进气口和出气口 1 绕 Y 轴扭转
4	692.77	滤芯内滤网整体向下凹陷
5	774.52	滤芯内滤网下方向上凸起
6	786.89	滤芯内滤网上方向上凸起

将上表 1 中固有频率数值随阶数变化的柱状图绘制于下图 5 中。



**Figure 5.** Bar graph of natural frequency with order

**图 5.** 固有频率随阶数变化的柱状图

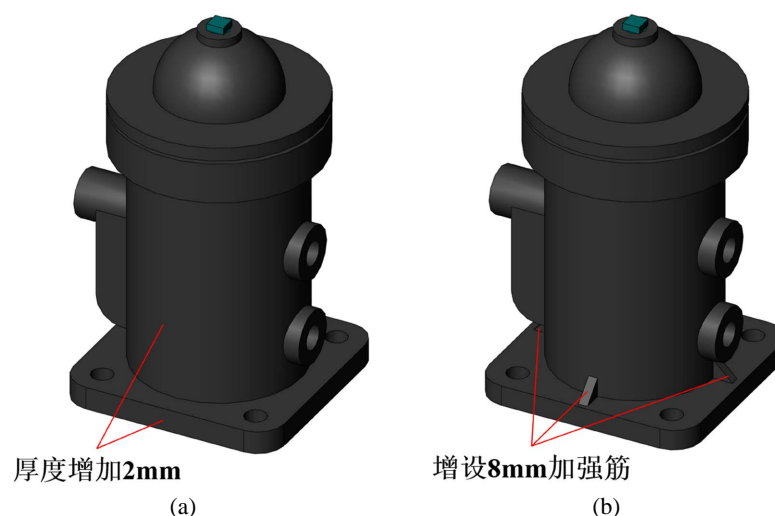
从上图 5 可知, 空气滤清器在约束条件下从 1 阶至 6 阶固有频率逐渐增大, 第 2 阶至第 3 阶固有频率增幅最大, 第 5 阶至第 6 阶固有频率增幅最小, 这与空气滤清器的结构及其材料属性是有很大关系的。

## 4. 空气滤清器优化设计

### 4.1. 优化设计方案的提出

在保证空气滤清器进出口流量等性能参数不变的前期下, 对现有的空气滤清器进行结构优化。优化方案 A: PP + GF30 塑料材质是空气滤清器常用的一种材料, 其密度为  $1130 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $5800 \text{ MPa}$ , 泊松比为 0.4 [2], 此方案将原有的材料替换为 PP + GF30 塑料材质; 优化方案 B: 考虑到空气滤清器是薄壁类零件, 此优化方案中将空气滤清器壳体外壁及壳体底座进行各加厚 2 mm 处理, 如下图 6(a)所示;

优化方案 C: 考虑到壳体底座是约束在汽车上的, 此优化方案在壳体底座周边增设四个厚度为 8 mm 的三角形加强筋, 如下图 6(b)所示。

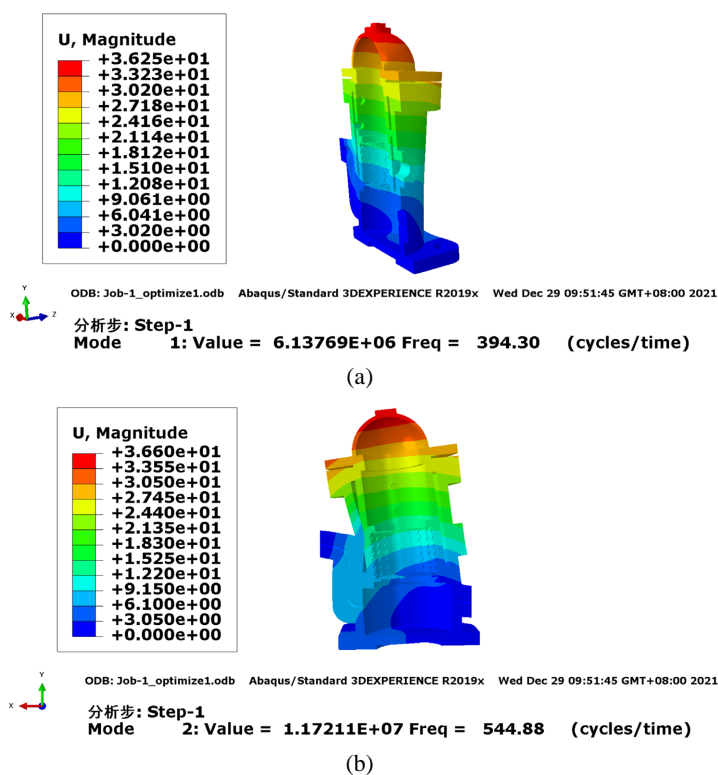


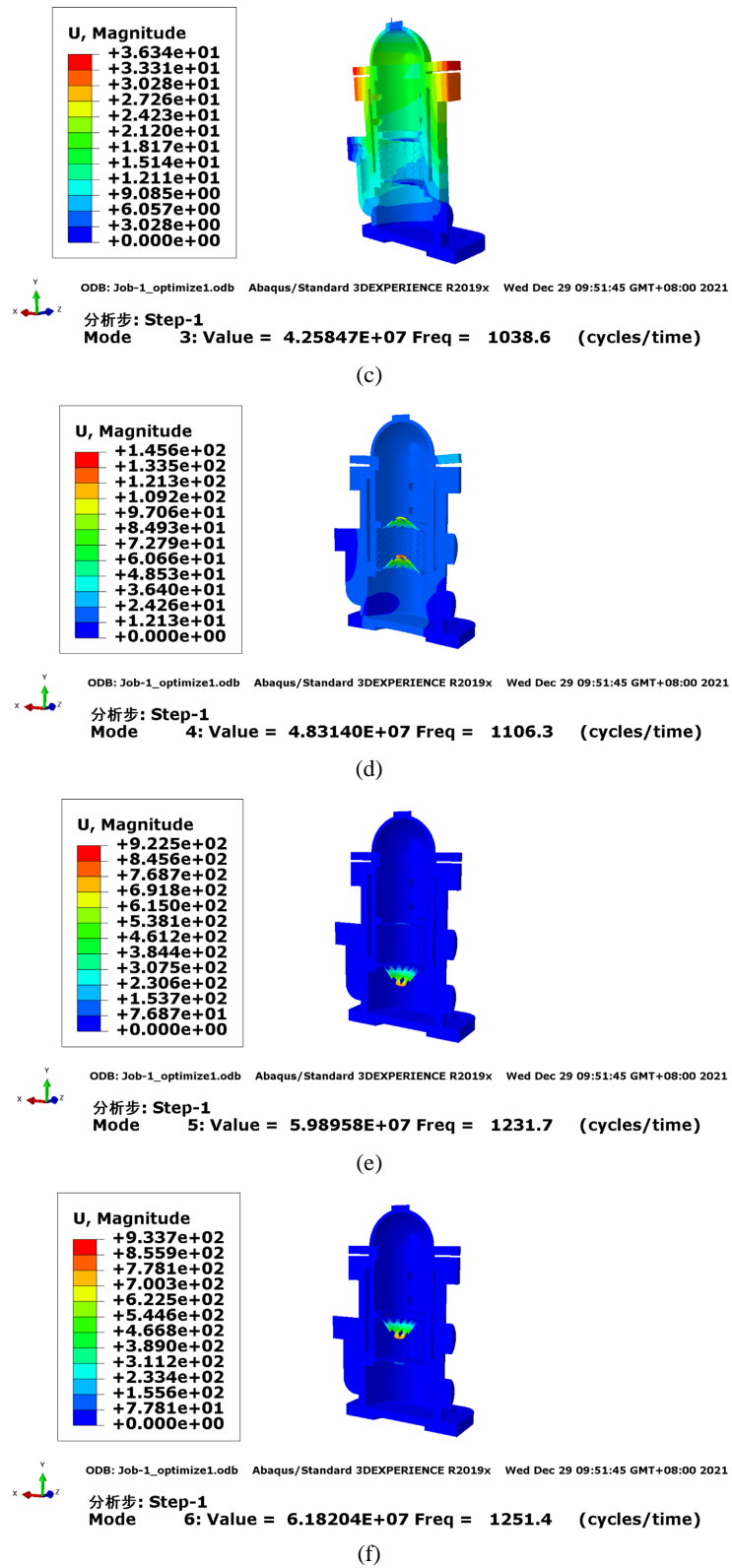
**Figure 6.** 3D models of optimization plan B and optimization plan C. (a) 3D model of optimization plan B; (b) 3D model of optimization plan C

**图 6.** 优化方案 B 及优化方案 C 的三维模型。(a) 优化方案 B 的三维模型; (b) 优化方案 C 的三维模型

#### 4.2. 优化方案结果分析

基于动态特性分析方法, 对三种优化方案进行分析, 三种优化方案的仿真结果如下图 7、图 8、图 9 所示。

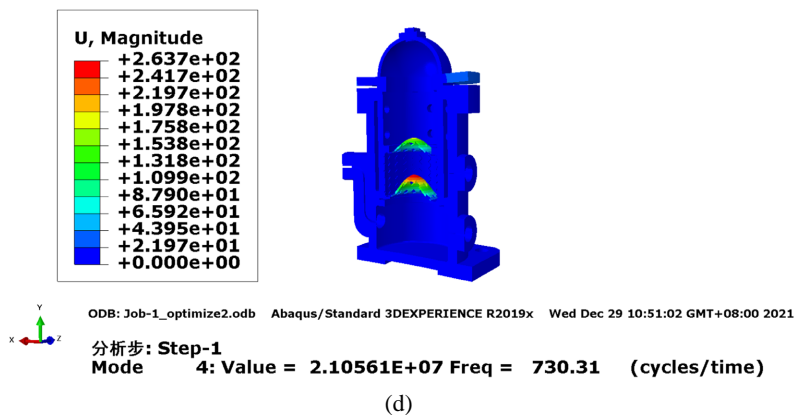
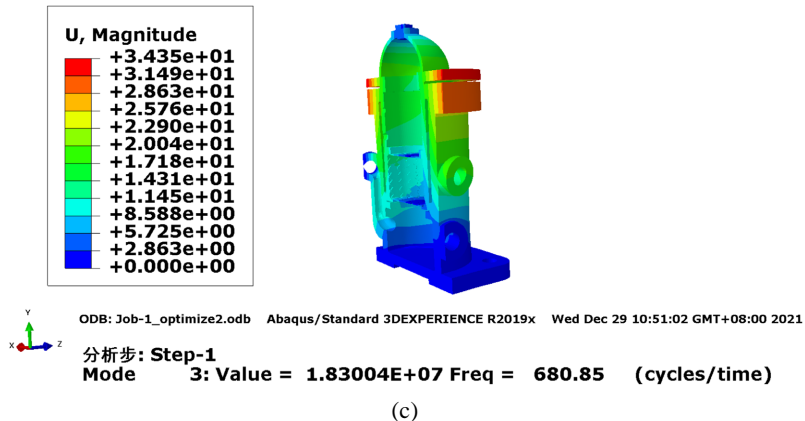
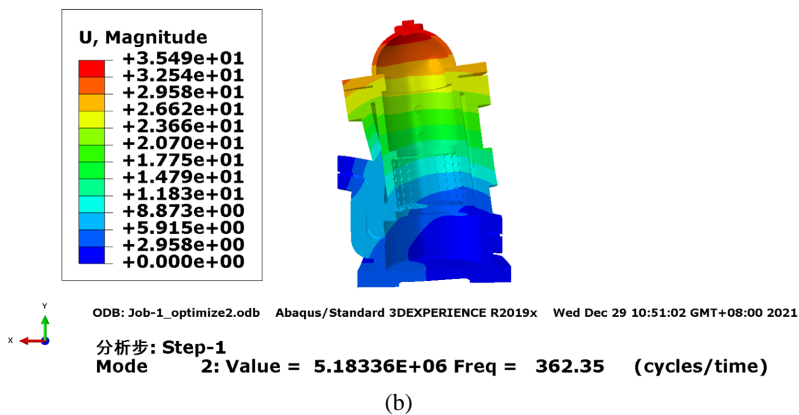
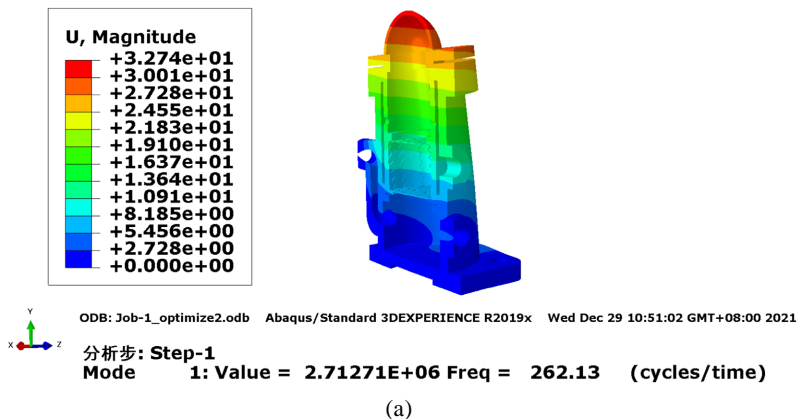


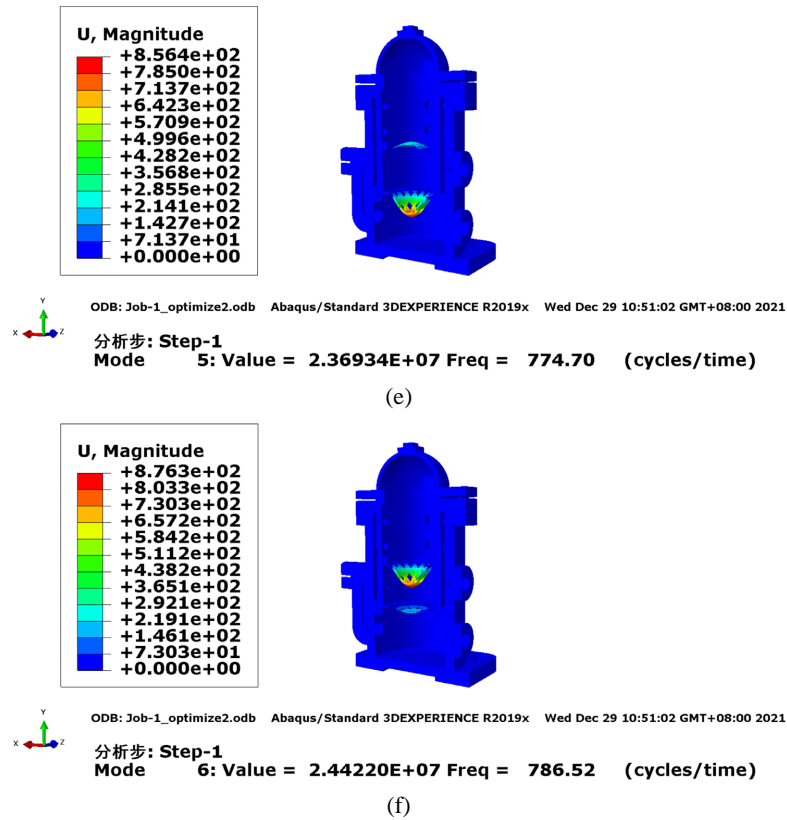


**Figure 7.** Simulation results of optimization plan A. (a) The 1 vibration mode; (b) The 2 vibration mode; (c) The 3 vibration mode; (d) The 4 vibration mode; (e) The 5 vibration mode; (f) The 6 vibration mode

**图 7.** 优化方案 A 的仿真结果。(a) 1 阶振型; (b) 2 阶振型; (c) 3 阶振型; (d) 4 阶振型; (e) 5 阶振型; (f) 6 阶振型

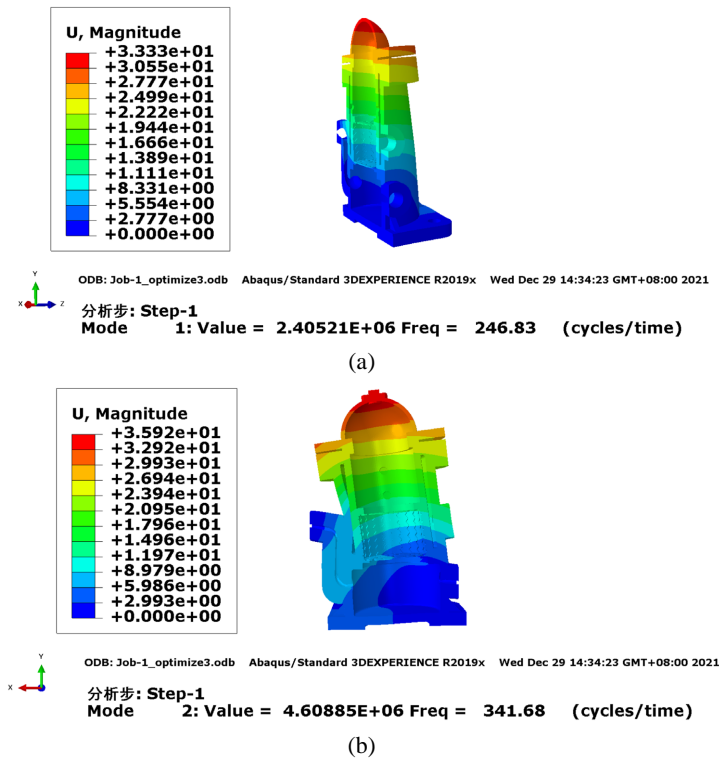


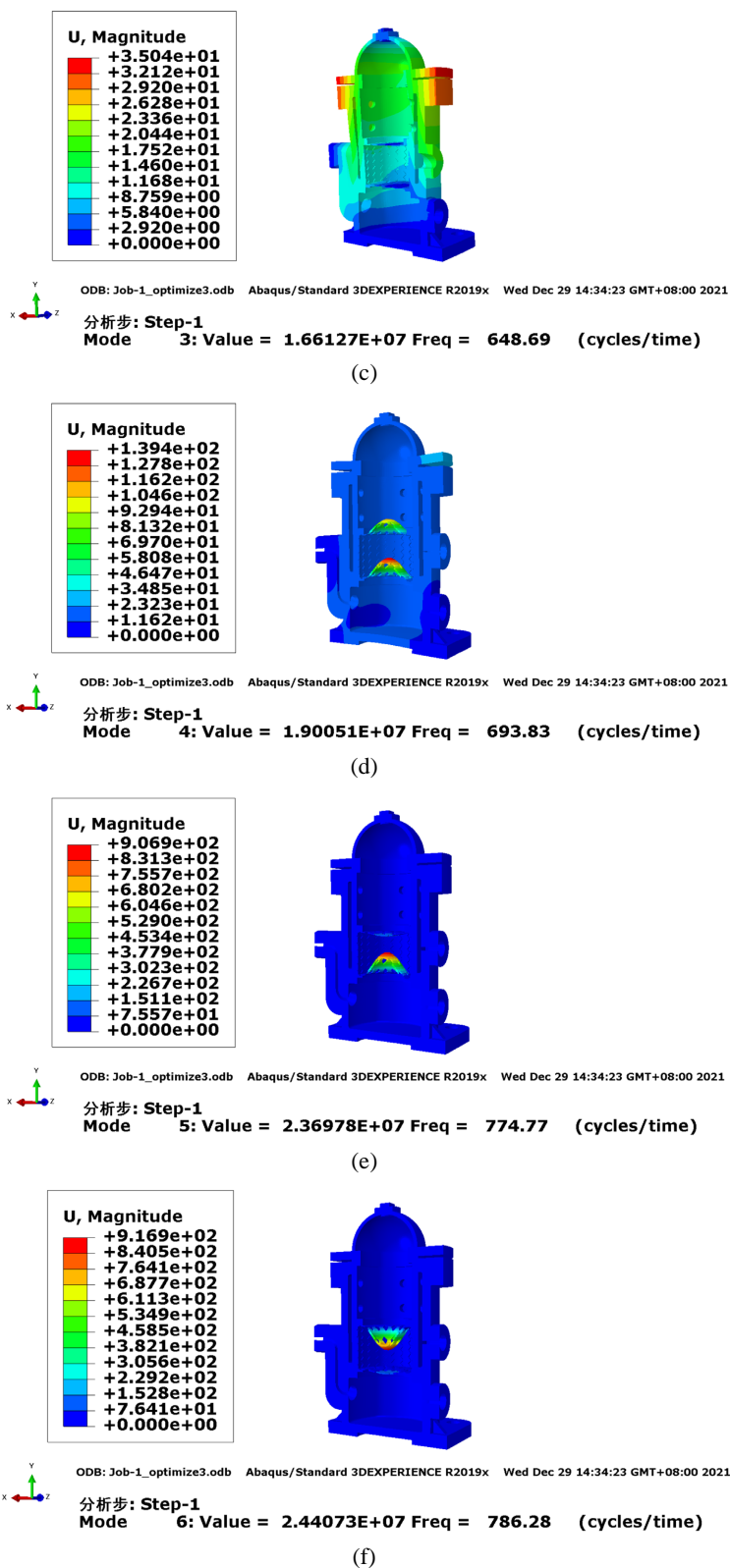




**Figure 8.** Simulation results of optimization plan B. (a) The 1 vibration mode; (b) The 2 vibration mode; (c) The 3 vibration mode; (d) The 4 vibration mode; (e) The 5 vibration mode; (f) The 6 vibration mode

**图 8.** 优化方案 B 的仿真结果。(a) 1 阶振型; (b) 2 阶振型; (c) 3 阶振型; (d) 4 阶振型; (e) 5 阶振型; (f) 6 阶振型





**Figure 9.** Simulation results of optimization plan C. (a) The 1 vibration mode; (b) The 2 vibration mode; (c) The 3 vibration mode; (d) The 4 vibration mode; (e) The 5 vibration mode; (f) The 6 vibration mode

**图 9.** 优化方案 C 的仿真结果。(a) 1 阶振型; (b) 2 阶振型; (c) 3 阶振型; (d) 4 阶振型; (e) 5 阶振型; (f) 6 阶振型

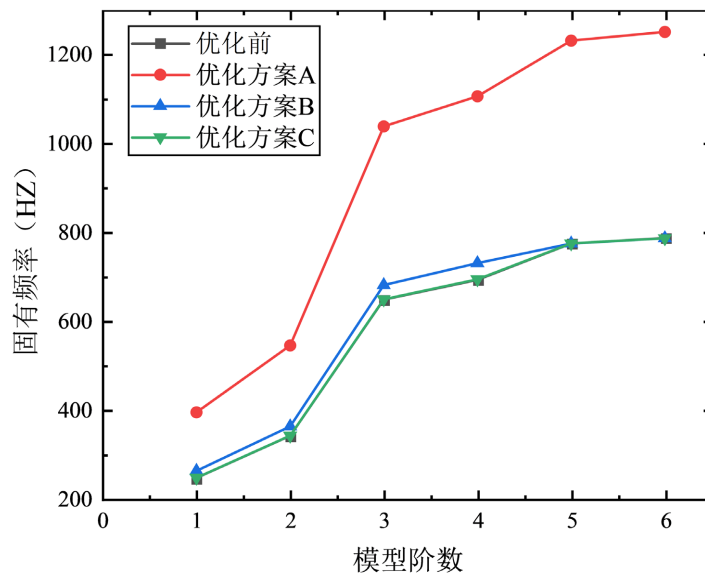
根据上图 7、图 8、图 9 的优化方案仿真结果, 得到三种优化方案的前 6 阶固有频率, 并计算了各个方案固有频率相对原方案的增加比率, 如下表 2 所示。

**Table 2.** Natural frequency and increase ratio of three optimization schemes

**表 2.** 三种优化方案固有频率值和增加比率

固有频率(Hz)	方案 A	增加比率	方案 B	增加比率	方案 C	增加比率
1 阶	394.3	59.95%	262.13	6.33%	246.83	0.13%
2 阶	544.88	59.61%	362.35	6.14%	341.68	0.08%
3 阶	1038.6	60.26%	680.85	5.06%	648.69	0.09%
4 阶	1106.3	59.69%	730.31	5.42%	693.83	0.15%
5 阶	1231.7	59.03%	774.70	0.02%	774.77	0.03%
6 阶	1251.4	59.03%	786.52	-0.05%	786.28	-0.08%

根据上表 2 中三种优化方案的 6 阶固有频率数值, 结合表 1 中空气滤清器优化前的 6 阶固有频率数值, 对比空气滤清器优化前后固有频率变化趋势, 如下图 10 所示。



**Figure 10.** Six order natural frequency variation trend before and after air filter optimization

**图 10.** 空气滤清器优化前后 6 阶固有频率变化趋势

由上表 2 及图 10 可知, 不管优化与否, 空气滤清器的 6 阶固有频率均呈现增大趋势, 且第 2 阶至第 3 阶固有频率增速最快。相比于原方案, 优化方案 A 从 1 阶至 6 阶固有频率均大幅度增加, 平均增加比率为 59.60%, 优化方案 A 中 PP + GF30 塑料材质由于其刚性较大, 因此不容易变形, 故其固有频率较高; 与原方案相比, 优化方案 B 从 1 至 5 阶固有频率均有所增加, 第 6 阶固有频率有微小的减少, 平均增加比率为 3.82%; 与原方案相比, 优化方案 C 的 6 阶固有频率基本没有变化, 平均增加比率为 0.07%。综上, 从空气滤清器使用寿命及其经济性角度出发, 考率到 PP + GF30 塑料材质的成本较高, 故优化方案 B 即将空气滤清器壳体外壁及壳体底座进行各加厚 2 mm, 满足结构优化要求。

## 5. 结论

本文以某汽车空气滤清器为研究对象, 基于三维软件 SolidWorks 建立空气滤清器几何模型, 并在有限元仿真软件 Abaqus 中对其进行约束模态分析, 仿真结果表明该空气滤清器的基频(1 阶固有频率)为 246.52 Hz, 固有频率从 1 阶至 6 阶依次增大, 第 6 阶固有频率为 786.89 Hz。本文针对该空气滤清器提出的三种优化方案中, 考虑到空气滤清器使用寿命及其经济性问题, 优化方案 B 即将空气滤清器壳体外壁及壳体底座进行各加厚 2 mm, 能使空气滤清器的各阶固有频率都有所提高, 基频提高 6.33%, 1 阶至 6 阶固有频率总体提高 3.82%, 优化后的结构达到了较为满意的效果。

## 参考文献

- [1] 庞剑, 谌刚, 何华. 汽车噪声与振动: 理论与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [2] 白子琦, 李光武. 基于 Abaqus 仿真分析的某项目空气滤清器模态性能优化[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(21): 46-48. <http://doi.org/10.16638/j.cnki.1671-7988.2020.21.014>
- [3] 关英俊, 张力锋, 李想, 张疆平. 汽车空气滤清器的模态分析及结构优化[J]. 计算机仿真, 2015, 32(4): 124-128.
- [4] 刘士军. 汽车空气滤清器的结构分析及优化探讨[J]. 南方农机, 2018, 49(15): 178+180.
- [5] 张宇, 曾超, 袁帅, 郝鹏飞, 李艳君. 基于 Abaqus-fe-safe 的空气滤清器振动疲劳分析[J]. 内燃机与动力装置, 2016, 33(06): 33-36. <http://doi.org/10.19471/j.cnki.1673-6397.2016.06.008>
- [6] 栾宝奇, 王大鹏, 刘鑫. 机车空气滤清器整机试验台的研发[J]. 铁道机车与动车, 2020(12): 46-48.
- [7] 魏敏, 魏宁, 李俊虎. 某型起动机定子模态分析[J]. 现代车用动力, 2020(3): 25-29.
- [8] 黄从阳, 李旭锋. 基于 ABAQUS 的轴承座静力学和动力学分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(11): 125-128.