

汽车挡风玻璃洗涤液喷水壶动态特性分析

姚胜辉¹, 何 锋^{1*}, 刘定一², 罗忠福¹

¹贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳

²奇瑞万达贵州客车股份有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年4月21日; 录用日期: 2024年5月16日; 发布日期: 2024年5月22日

摘 要

为了验证某车用喷水壶产品的动态特性是否满足工程设计要求, 基于Ansys有限元仿真软件对该产品进行约束模态分析, 得出产品的固有频率及对应的各阶振型, 并对其模态特性进行分析; 基于模态分析结果对该产品进行谐响应分析, 考察其在模拟工况下共振位置的应力情况, 从而找出箱体结构的薄弱部位。分析表明: 喷水壶产品的前六阶固有频率不会与发动机激励频率(怠速和通常工作转速的情况下)、路面激励频率发生共振; 当加入外部激励, 喷水壶振动频率与模态固有频率接近时, 其支架A与箱体衔接部位最先容易产生疲劳破坏。经过对薄弱部位进行结构改进, 改进后该部位的频响应力降低了45.11%, 增强了喷水壶的整体强度。

关键词

喷水壶, 有限元, 动态特性, 模态, 谐响应

Analysis of Dynamic Characteristics for Windshield Washer Reservoir of Vehicles

Shenghui Yao¹, Feng He^{1*}, Dingyi Liu², Zhongfu Luo¹

¹College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Chery Wanda Guizhou Bus Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: Apr. 21st, 2024; accepted: May. 16th, 2024; published: May. 22nd, 2024

Abstract

In order to verify whether the dynamic characteristics of a car washer reservoir product meet the requirements of engineering design, the constrained modal analysis of the product is carried

*通讯作者。

文章引用: 姚胜辉, 何锋, 刘定一, 罗忠福. 汽车挡风玻璃洗涤液喷水壶动态特性分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2478-2488. DOI: 10.12677/mos.2024.133226

out based on Ansys finite element simulation software, and the natural frequency and corresponding vibration modes of the product are obtained, and the modal characteristics are analyzed. Based on the results of modal analysis, the harmonic response of the product is analyzed, and the stress of the resonant position under simulated working conditions is investigated, so as to find out the weak part of the box structure. The analysis shows that the first six natural frequencies of the washer reservoir product will not resonate with the engine excitation frequency (idle speed and normal working speed) and the road excitation frequency. When the external excitation is added, the vibration frequency of the washer reservoir is close to the natural frequency of the mode, and the joint part of the support A and the box is the first easy to produce fatigue damage. After improving the structure of the weak part, the frequency response force of the improved part is reduced by 45.11%, and the overall strength of the washer reservoir is enhanced.

Keywords

Washer Reservoir, Finite Element, Dynamic Characteristics, Modes, Harmonic Response

Copyright © 2024 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

汽车喷水壶(以下简称喷水壶)是用于盛放汽车挡风玻璃洗涤液的塑件容器,其在汽车雨刮器系统中扮演着一个重要角色。由于该产品安装在汽车发动机附近,在剧烈振动和液体载荷冲击情况下会使其薄弱部位发生疲劳断裂,因此,在喷水壶开发设计阶段,应当对产品的动态特性进行分析,确保其满足使用强度要求。文献[1]基于模态分析方法,对某燃油箱进行动态特性分析,进一步优化其油箱隔板结构设计,通过扫频激振试验表明改进后的设计可提高油箱固有频率,从而避开共振频率范围。文献[2]基于 ANSYS 软件,对某发动机连杆进行模态分析与谐响应分析,确定了其共振频率及区域,为连杆结构优化提供参考。文献[3]基于模态分析与 CFD 分析,对某膨胀箱薄弱部位的改进方案进行评估,改进后的方案通过了耐久性试验验证。文献[4]基于有限元模型与功率谱密度,分别对某轻型载货车尿素箱支架进行模态性能分析和振动疲劳分析,然后采用二代非劣排序遗传算法对其主体支架进行优化,优化后的方案减轻了支架重量,且通过了整车道路验证。文献[5]基于有限元分析方法对乘用车油箱进行模态分析与谐响应分析,得出油箱的薄弱部位,为后期结构改进提供参考。

本文运用 Ansys Workbench 软件对喷水壶模型进行模态与谐响应分析,得出喷水壶产品的固有频率及对应振型,并确定了其发生共振的频率及部位,为喷水壶的结构设计及优化提供理论依据。

2. 有限元模型建立

喷水壶的材料特性如表 1 所示。

Table 1. Washer reservoir material characteristics

表 1. 喷水壶材料特性

材料	弹性模量/Mpa	密度/(t/mm ³)	泊松比	屈服强度/Mpa
PP5	1000	9.1E-10	0.42	25

该喷水壶由上箱体和下箱体组成，其主要结构如图 1 所示，上、下箱体均采用注塑成型，通过粘接形成一体。箱体由支架 A、B、C 进行固定，限制六个自由度。

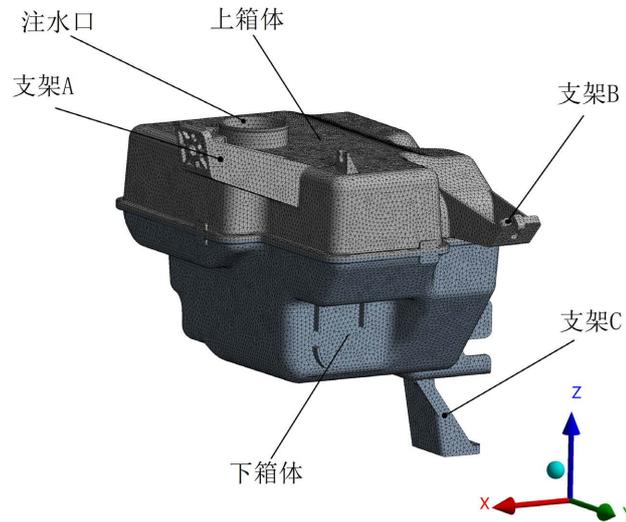


Figure 1. Finite element model of washer reservoir
图 1. 喷水壶有限元模型

在不影响喷水壶主要特征和整体结构力学性能的前提下，对原几何特征(如小圆孔、凹槽等)进行适当简化，并通过有限元软件 Ansys Workbench 对其进行网格划分。由于模型结构相对复杂，为兼顾网格质量与运算速率，将单元尺寸设置为 3 mm，网格划分后喷水壶最终模型的节点数为 376,928，单元总数为 192,162。

3. 约束模态分析

3.1. 模态分析理论

模态分析是一种用于确定所研究结构的振动特性(固有频率和振型)的方法,可通过建立喷水壶的运动微分方程来研究其的动态特性。

喷水壶的动力学方程可表示为:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; \ddot{x} 为加速度向量; \dot{x} 为速度向量; x 为位移向量; $F(t)$ 为外部载荷。

在实际的应用场景中,其阻尼很小,因此可采用无阻尼模态分析理论对其进行分析,即无阻尼线性结构自由振动的动力学方程式:

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (2)$$

设简谐运动方程为:

$$x(t) = \varphi_i \sin(\omega_i t) \quad (3)$$

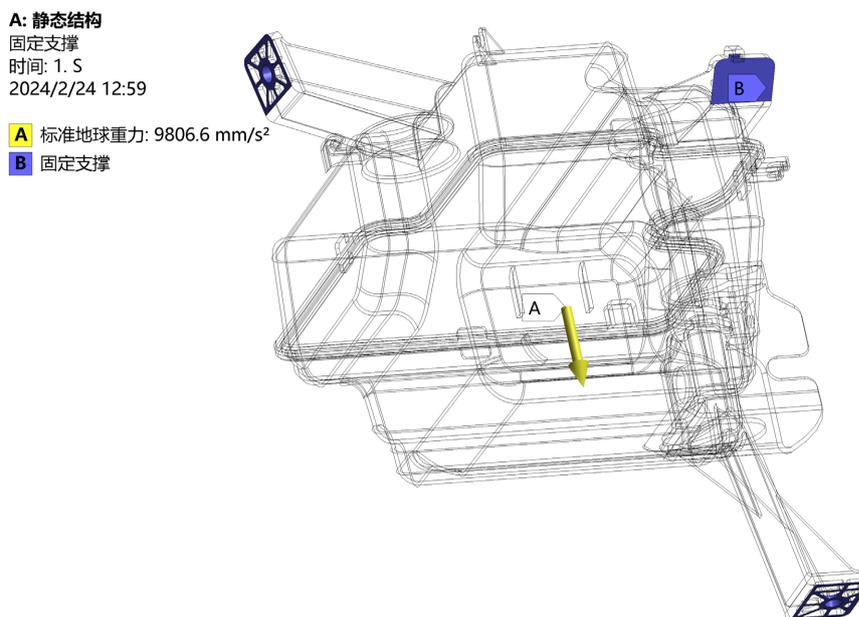
可得无阻尼运动方程为:

$$(K - \omega_i^2)M\varphi_i = 0 \quad (4)$$

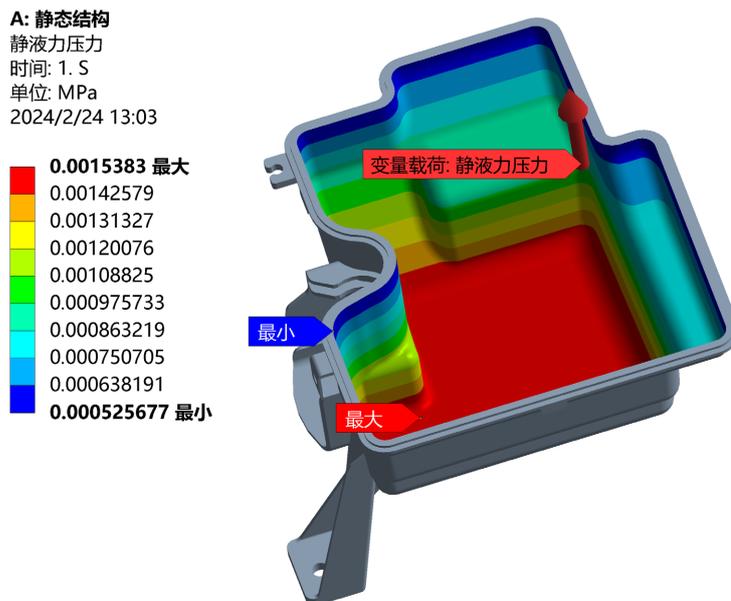
通过求解式(4)即可得出固有频率 ω_i 与振型 φ_i 。

3.2. 边界条件设置

喷水壶的受力由自身重力和冷却液对箱体内壁的压力组成，约束模态仿真分析边界条件：对喷水壶施加标准地球重力加速度惯性载荷；设置洗涤水箱三个支架位置螺栓孔处固定约束；采用静水压力法对内壁施加载荷，选取箱内冷却液到达最高液面高度作为液体自由面。其边界条件见图 2 所示。



(a) 整体约束



(b) 静水压力

Figure 2. Washer reservoir boundary condition constraints

图 2. 喷水壶边界条件约束

3.3. 模态分析

设置好边界条件和材料参数后, 对其前六阶自由模态进行求解, 得出各阶固有频率及模态振型特点, 如图 3 所示。

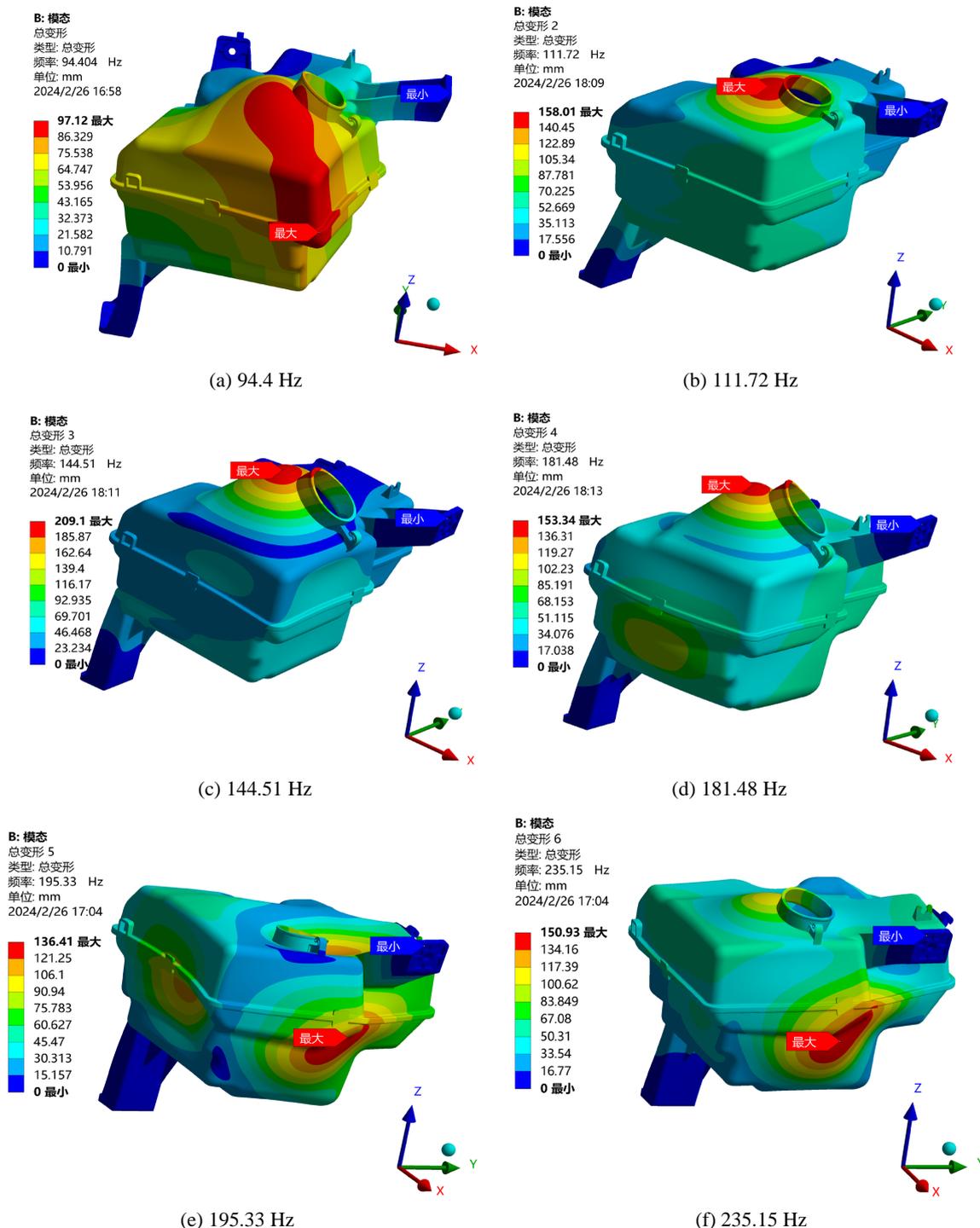


Figure 3. Cloud map of the first six natural frequencies and modes of the washer reservoir

图 3. 喷水壶的前六阶固有频率及振型云图

图 3(a)为喷水壶的第一阶振型, 对应的固有频率为 94.4 Hz。该阶振型主要集中在上箱体, 表现为双峰振动, 振动中心位置主要集中在支撑弱侧的箱体边缘, 振动幅值中心最大, 向四周逐渐减小。图 3(b)为喷水壶的第二阶振型, 对应的固有频率为 111.72 Hz。该阶振型主要集中在上箱体, 表现为单峰振动, 振动中心集中在注水口附近, 振动幅值从中心向四周逐渐减小。图 3(c)为喷水壶的第三阶振型, 对应的固有频率为 144.51 Hz。该阶振型与第二阶振型的位置和方向基本相同, 也表现为单峰振动, 但此时的振动幅值加大。图 3(d)为喷水壶的第四阶振型, 对应的固有频率为 181.48 Hz。该阶振型与前两阶振型的位置和方向基本相同, 表现为单峰振动, 振动幅值相对上一阶有所减小。图 3(e)为喷水壶的第五阶振型, 对应的固有频率为 195.33 Hz。该阶振型在上、下箱体均有分布, 且都表现为单峰振动, 最大振型出现在下箱体的侧面, 而分布在上箱体注水口附近的振型相对较小。图 3(f)为喷水壶的第六阶振型, 对应的固有频率为 235.15 Hz。该阶振型在上、下箱体均有分布, 在下箱体侧面有一个振幅较大的单峰振动, 上箱体注水口附近有一个小振幅的单峰振动。

根据模态分析结果显示, 喷水壶的前六阶固有频率在 90~240 Hz 这个范围内, 为避免其固有频率与外部激励频率发生共振, 应当使二者频率相互错开。喷水壶的外部激励源主要包括发动机激励、路面激励和传动系激励等[6] [7] [8], 其中主要受发动机激励和路面激励的影响较大。

发动机激励频率可用公式表示为[9]:

$$f = \frac{2 \times m \times n}{60 \times \tau} \quad (5)$$

式中: f 为发动机激励频率; m 为发动机转速; n 为气缸数; τ 为发动机冲程数。

喷水壶应用于搭载四缸四冲程发动机的轿车中, 该车发动机怠速为 750 r/min; 正常工作转速范围为 1500~2500 r/min; 分别带入式(5)计算得: 发动机怠速的激励频率为 25 Hz, 正常工作激励频率范围为 50~83.33 Hz。由此可见, 一般情况下发动机怠速和正常工作转速的激励频率与喷水壶的固有频率相差较大, 可避免共振情况的发生; 常见路面激励引起的汽车振动频率范围为 0~20 Hz [10], 然而喷水壶的固有频率远大于汽车行驶时的振动频率, 因此二者也不会发生共振。

通过喷水壶的约束模态分析可知, 当喷水壶所受到外部激励频率低于 85 Hz 时, 可有效避免共振发生, 但是由于车辆在实际行驶过程中, 外部激励频率范围相对较宽, 可能会受到短暂的高频激励的影响, 从而对箱体造成疲劳损伤, 因此还需要对喷水壶进行谐响应分析, 进一步验证其共振位置的应力状态能否满足设计要求。

4. 谐响应分析

4.1. 谐响应分析理论

基于模态分析结果, 谐响应分析是用于研究不同频率载荷作用下的动态特性和周期性载荷作用下的结构响应, 为进一步改进及优化结构提供理论依据。

喷水壶在简谐载荷作用下的运动方程可表示为:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t)\sin(\theta t) \quad (6)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; $F(t)$ 为外部载荷。

其节点位移方程为:

$$x = A\sin(\theta t + \psi) \quad (7)$$

通过求解式(7)即可得出位移幅值向量 A 与位移响应滞后激励载荷的相位角 ψ 。

4.2. 边界条件设置

基于喷水壶模态分析的结果，采用模态叠加法对其工况进行谐响应分析，边界条件设置为：在固定约束处同时施加前后(X方向)、左右(Y方向)、上下(Z方向)的加速度，对应的加速度大小分别为 1.5 g、1.5 g、3 g，将求解频率范围设置为 25~500 Hz，求解间隔设置为 50。

4.3. 谐响应分析

分析得出应力频率响应的部分结果如图 4~6 所示。

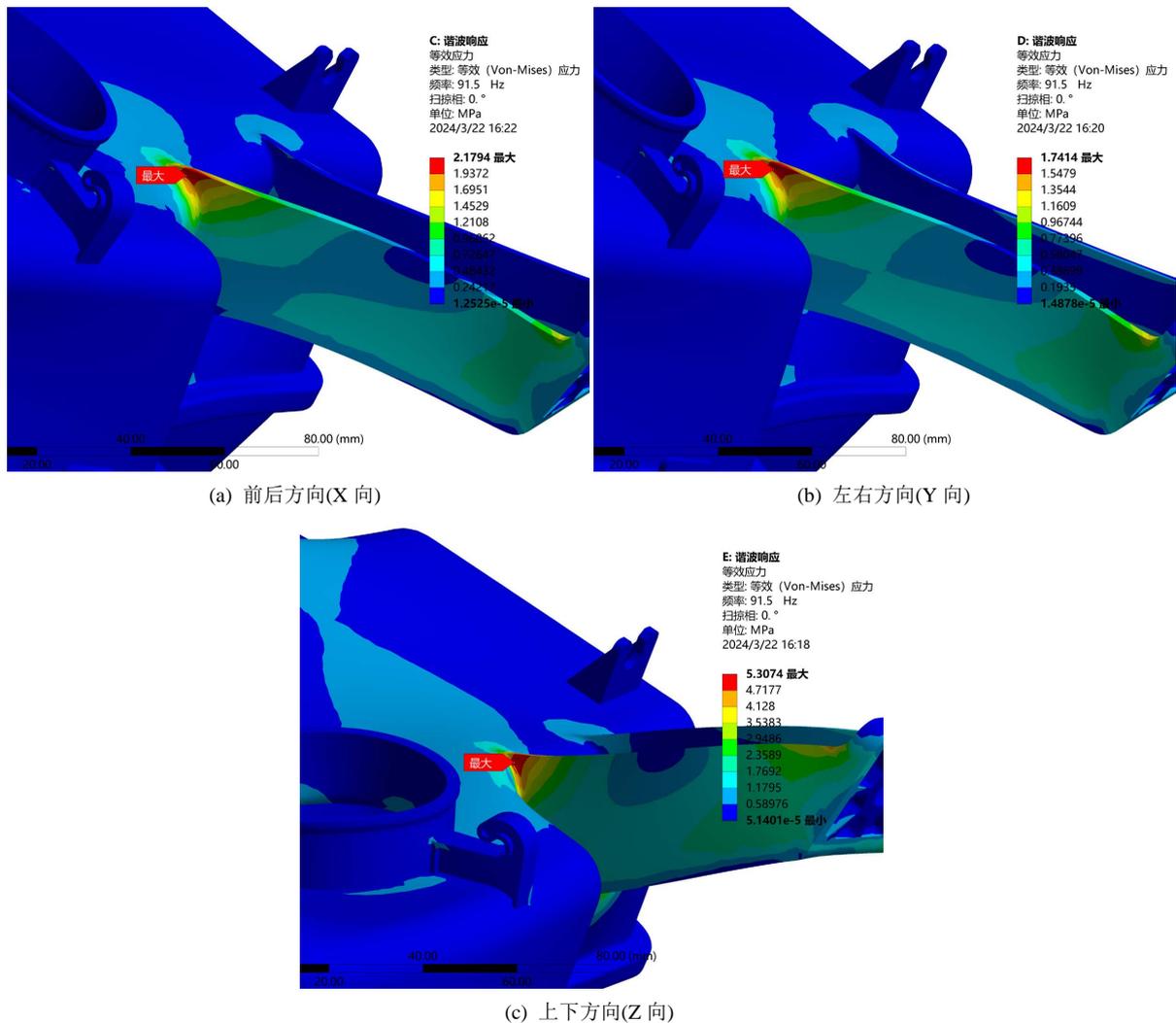


Figure 4. Equivalent stress cloud map with a frequency response of 91.5 Hz

图 4. 频率响应为 91.5 Hz 的等效应力云图

喷水壶频率响应的应力峰值如表 2 所示。

由上述结果分析可知，在扫频 25~500 Hz 范围内，出现了三个频响峰值：91.5 Hz、110.5 Hz、196 Hz，分别与喷水壶的一、二、五阶固有频率接近。当激励频率为 91.5 Hz 时，各工况条件下最大应力峰值均出现在支架 A 与箱体衔接部位的左上圆角处；当激励频率为 110.5 Hz 和 196 Hz 时，各工况条件下的最大

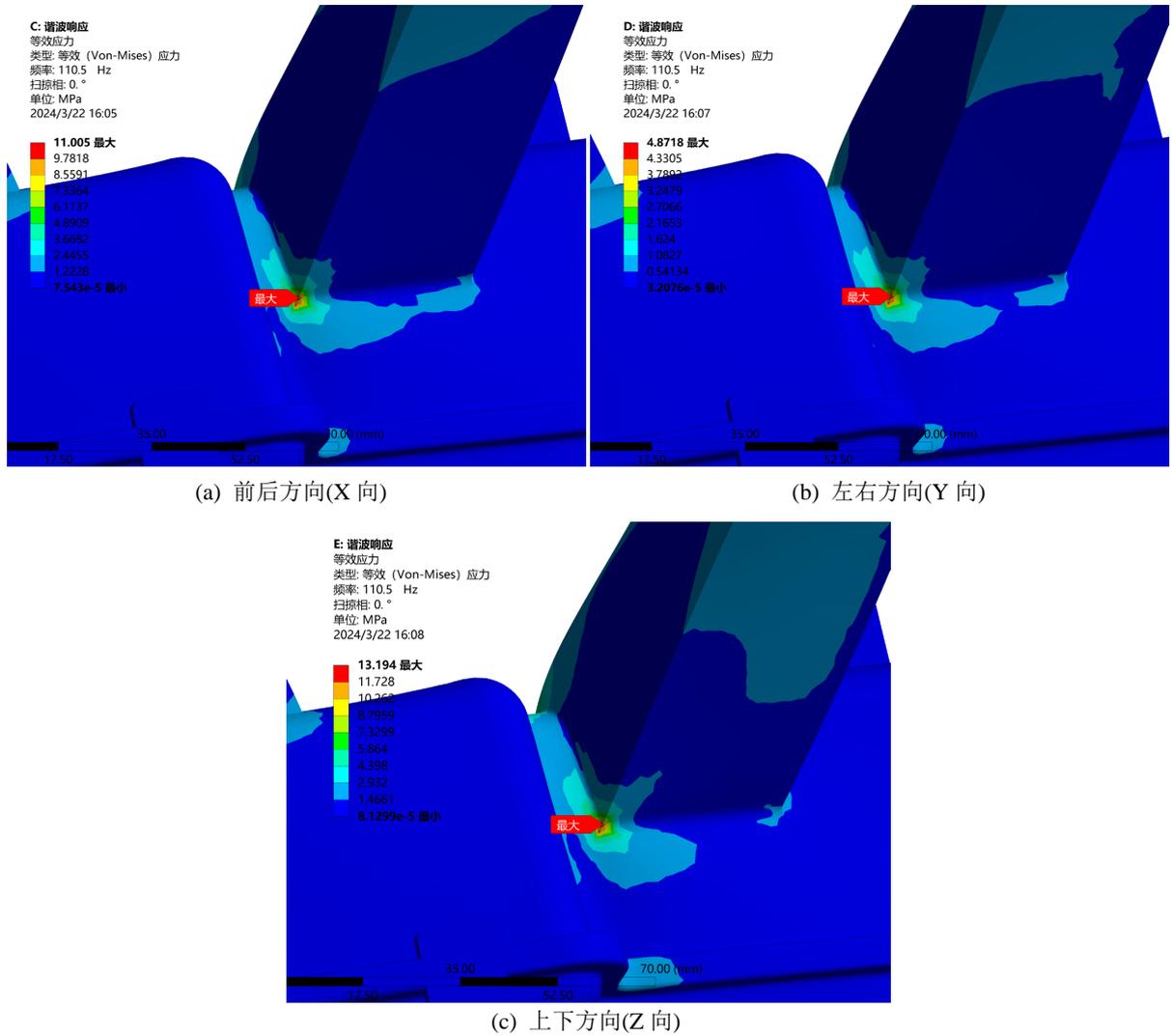
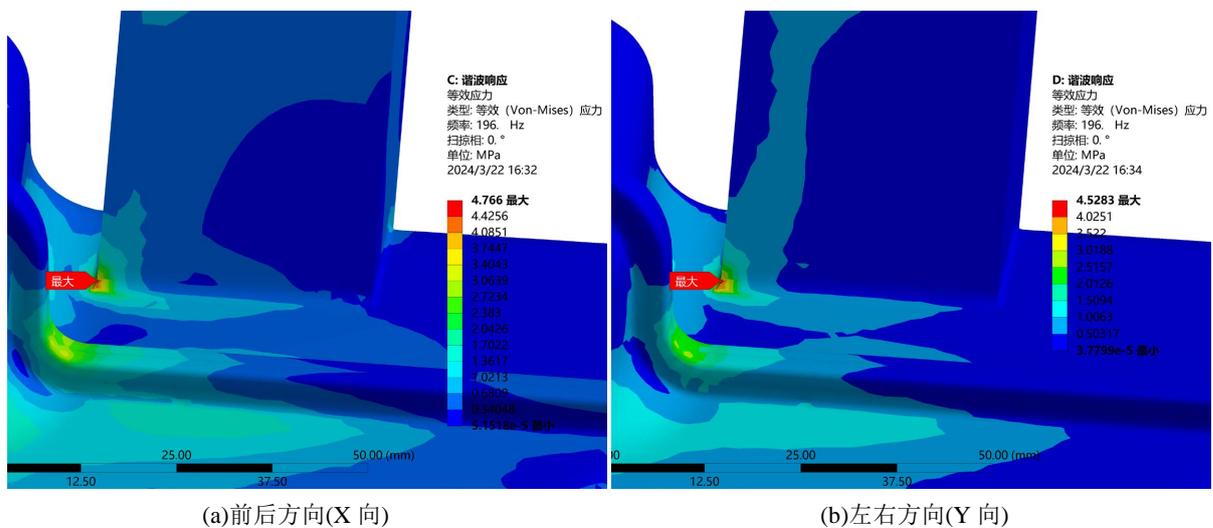
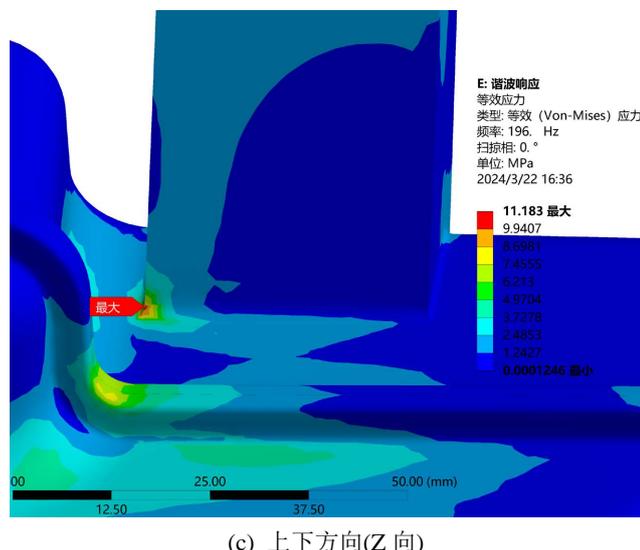


Figure 5. Equivalent stress cloud map with a frequency response of 110.5 Hz
 图 5. 频率响应为 110.5 Hz 的等效应力云图





(c) 上下方向(Z 向)

Figure 6. Equivalent stress cloud map with a frequency response of 196 Hz**图 6.** 频率响应为 196 Hz 的等效应力云图**Table 2.** Results of stress frequency response of washer reservoir**表 2.** 喷水壶应力频率响应结果

激励方向	应力峰值/MPa		
	91.5 Hz	110.5 Hz	196 Hz
前后(X 向)	2.18	11.01	4.77
左右(Y 向)	1.74	4.87	4.53
上下(Z 向)	5.31	13.19	11.18

应力峰值均出现在支架 A 与箱体衔接部位的左下圆角处，其中当激励频率为 110.5 Hz (激励方向为 Z 向) 时，出现最大应力峰值，大小为 13.19 MPa。由此看出，当外界激励频率与喷水壶的固有频率接近时，其支架 A 与箱体衔接部位的左侧容易受到影响，因此需要适当增强该部位的强度。

5. 结构改进

由谐响应分析可知，支架 A 有两处位置应力值较大，在载荷冲击作用下容易产生疲劳破坏，因此对该部位的支架板进行增厚强化，如图 7 所示。改进后继续进行相同的仿真验证，结果表明：如图 8 显示，改进后喷水壶的各阶固有频率稍有提高，薄弱部位的峰值应力由原来的 13.19 MPa 降到了 7.24 MPa，降幅大约为 45.11%，明显提高了喷水壶的结构强度，同时也一定程度上验证了仿真分析的准确性。

6. 结论

建立了喷水壶有限元模型，分别对其进行模态和谐响应分析，可以得出：

(1) 通过约束模态分析得出喷水壶前六阶的固有频率及振型，其低阶固有频率远超过发动机怠速激励频率、发动机正常工作激励频率和路面激励频率，避免了共振发生，因此其模态性能满足要求。

(2) 通过谐响应分析发现，当外部激励频率接近喷水壶的固有频率时，支架 A 与箱体衔接部位的左侧上、下圆角处容易发生振动破坏，因此为确保喷水壶总成能够满足使用要求，应适当增加该部位的强度。

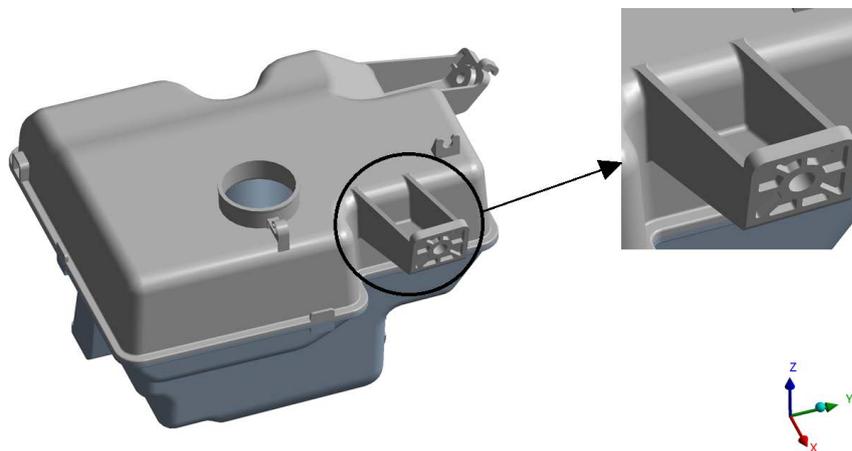


Figure 7. Structural improvement of bracket A
图 7. 支架 A 的结构改进

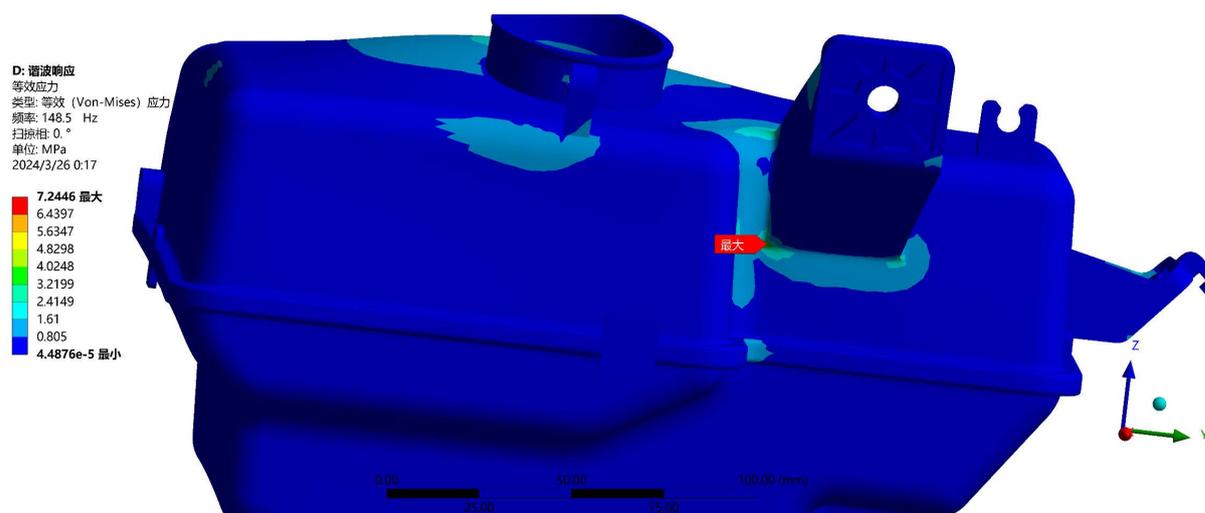


Figure 8. The maximum stress value of bracket A after improvement
图 8. 支架 A 改进后的最大应力值

(3) 对支架 A 进行结构改进后, 薄弱部位的频响应力下降了 45.11%, 从而提高了喷水壶的整体强度。

基金项目

黔科合成果[2023]一般 003。

参考文献

- [1] 尹辉俊, 刘赞, 汪洋, 等. 某金属燃油箱的模态分析及其隔板结构的改进[J]. 机械设计, 2017, 34(11): 94-97.
- [2] 郑彬, 鄂靖元. 发动机连杆有限元模态分析及谐响应分析[J]. 机械设计, 2020, 37(S1): 98-101.
- [3] 于洋磊, 曾志新, 冯博, 等. 乘用车膨胀箱结构分析及改进[J]. 汽车零部件, 2021(3): 56-61.
- [4] 梁国栋, 程乐. 某轻型载货车尿素箱支架振动特性分析及其优化[J]. 机械设计与制造, 2022(2): 282-286.
- [5] 孙钊, 徐兵, 王玉勤, 等. 某乘用车燃油箱振动的谐响应分析研究[J]. 巢湖学院学报, 2023, 25(3): 96-102.
- [6] 马骊溟, 朱智民, 安占飞, 等. 轿车白车身模态分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 214-218.
- [7] 李明, 朱宝. 有限元分析技术在汽车轮毂设计中的应用研究[J]. 工业设计, 2019(3): 154-155.

- [8] 高庆, 徐建建, 宿峰. 轻量化铝合金骨架车车架有限元分析[J]. 车辆与动力技术, 2021(4): 15-22.
- [9] 《汽车工程手册》编辑委员会. 汽车工程手册试验篇[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [10] 郑益谦, 上官文斌. 管路型带附加气室空气弹簧的时域动态特性建模[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6): 1539-1545.