

一体罐隔振器静力学仿真分析研究

张佳亚

江南造船(集团)有限责任公司, 江南研究院, 上海

收稿日期: 2025年9月15日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年10月24日

摘要

一体罐隔振器主要用于实现一体式气罐与舰船舱体的减振作用, 减少舱体向一体式气罐的振动与噪声传递, 提升一体罐的上舰安全性。为保证一体罐隔振器在不同工况下的安全可靠, 本研究基于有限元分析软件Abaqus建立了一体罐隔振系统的分析模型, 通过施加不同的载荷与边界条件, 模拟舰船在实际运行过程中的倾斜与摇摆工况, 研究一体罐隔振器的位移响应结果。通过对比倾斜工况下的仿真位移响应结果与理论计算结果, 二者高度一致, 充分证明了本文提出的静力学仿真分析方法具有优秀的可行性与准确性, 同时本文提出的方法能够明确一体罐隔振器在多种工况下的静力学特性, 为一体罐隔振器的设计与安装工作提供理论指导。

关键词

一体罐隔振器, 静力学特性, 有限元, 仿真分析

Static Simulation Analysis of Integrated Tank Vibration Isolator

Jiaya Zhang

Jiangnan Research Institute, Jiangnan Shipyard (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: September 15, 2025; accepted: September 22, 2025; published: October 24, 2025

Abstract

Integrated tank vibration isolators are primarily employed to dampen the integrated gas tank and the ship cabin structure, reducing the transmission of vibration and noise from the cabin to the tank and enhancing the board-mounted safety of the integrated tank. To ensure the safety and reliability of the isolator under various working conditions, this study developed an analytical model of the integrated tank vibration isolation system using the finite element analysis software Abaqus. By applying different load and boundary conditions to simulate the tilt and sway scenarios encountered

during actual ship operation, the displacement response of the integrated tank vibration isolator was investigated. The simulation results under tilt conditions showed strong agreement with theoretical calculations, demonstrating the robustness and accuracy of the static simulation methodology proposed in this study. Furthermore, the method clarifies the static characteristics of the integrated tank vibration isolator under multiple working conditions, providing a theoretical foundation for its design and installation.

Keywords

Integrated Tank Vibration Isolator, Static Characteristics, Finite Element, Simulation Analysis

Copyright © 2025 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

一体罐隔振器用于一体罐与舱体的安装连接,其主要作用是实现弹性支撑代替刚性连接,减少和消除振动与冲击的传递,达到隔振、降噪、抗冲击的目的。橡胶隔振器是一种利用橡胶材料的弹性变形来隔离振动和冲击的装置[1]-[3]。它通常由金属件和天然或合成橡胶组成,结合了金属的强度和橡胶的弹性,广泛用于国防、航空航天等关键领域[4]。为了缩短开发周期并控制成本,可在进行样件试制与冲击试验之前,通过仿真方法对隔振器的冲击性能进行分析,从而提前评估设计方案的可行性。在隔振器力学性能的研究中,重点通常集中于静刚度与动刚度等关键参数的模拟与评估[5]-[9],该方向的研究对其工程应用与技术发展具有重要的意义。橡胶隔振器的工作原理主要依据弹簧-阻尼系统,其原理如图1所示,图中 m 表示系统质量, k 表示一体罐隔振器刚度, c 表示一体罐隔振器阻尼。

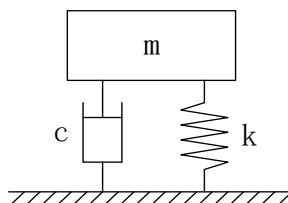


Figure 1. Schematic diagram of spring-damping system

图 1. 弹簧 - 阻尼系统原理图

在橡胶隔振器的力学性能研究中,王瑶瑶等[10]采用 LS-DYNA 软件建立隔振器冲击性能仿真分析有限元模型,并建立广义回归神经网络用于参数预测,从而获得其本构模型参数。Ben Zhang 等[11]引入一种在模拟静水压力条件下测量隔离器动态刚度的原始实验装置,并通过非线性试验确定了控制橡胶超弹性和粘弹性能的本构模型参数。Yu 等[12]设计了一种基于磁流变弹性体(MRE)的可调节刚度隔振器,其具有频移特性,并能在特定频段内实现了显著的减振效果。Dong 等[13]提出了一种新型的可变阻尼和可变刚度三向(3D)隔振器,用于控制复杂多向振动条件下的振动。

基于上述研究可见,现有关于隔振器性能的研究多集中于对其本构模型的描述。然而,由于隔振器的力学行为呈现高度非线性,传统线性理论难以准确描述。因此,往往需借助实验或仿真的方法,以确定其复杂的本构关系。本文将一体罐隔振器作为研究对象,建立了一体罐隔振系统的有限元分析模型,

通过使用有限元分析软件对一体罐隔振器进行静力学仿真，获得了一体罐隔振器在倾斜与摇摆工况下的位移响应结果，从而可以预测一体罐隔振系统在上述工况中的安装干涉问题，大大降低了计算的复杂性及实验预测的成本。

2. 一体罐隔振系统简介

针对一体罐隔振器的静力学特性研究，本文基于 Abaqus 对一体罐隔振系统进行建模并施加不同的工况条件，进而分析研究一体罐隔振器的静力学性能。

2.1. 一体罐隔振系统建模及网格划分

为简化分析过程，本文将一体式气罐等效为封闭圆柱壳。针对橡胶隔振器的弹簧 - 阻尼系统，通过设置“笛卡尔连接器”模拟其静力学特征。同时由于静力学仿真考察一体罐隔振器的变形特性，因此可将一体式气罐与潜艇舱体设置为刚体壳，其在静力工况下的变形对一体罐隔振器变形特性的影响可忽略不计。通过 Abaqus 建立的一体罐隔振系统有限元仿真模型如图 2 所示。本文仿真均以图 2 中坐标系作为参考。

网格划分是有限元仿真必不可少的前处理步骤，网格的数量及质量会对分析的精度及计算时长产生重要的影响。由于将一体罐简化为圆柱壳这类有明显拉伸或旋转路径的结构，故本研究使用扫掠网格划分有限元模型，并且为保证计算精度，共划分出 110,464 个网格，如图 3 所示。

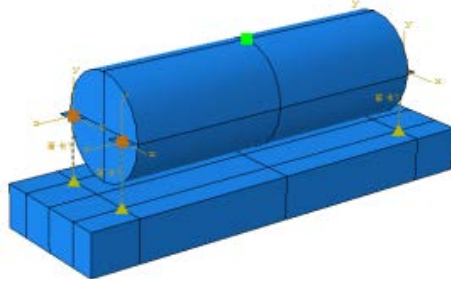


Figure 2. Finite element simulation model of integrated tank vibration isolation system
图 2. 一体罐隔振系统有限元仿真模型



Figure 3. Grid model
图 3. 网格模型

2.2. 工况条件

静力仿真主要针对系统在重力作用下的位移特性以及平衡状态，主要分析目的为：在倾斜工况下，求解出平衡状态下一体式气罐在各方向上的位移值；摇摆工况下求解出一体式气罐相对于原装配位置

的偏移位移。此结果对于预测一体罐与舱体在复杂工况下是否会出现安装干涉问题具有重要的工程意义。

2.2.1. 载荷及边界条件

1) 载荷

本研究中整个模型均处在重力场作用下，重力加速度取 9.81 m/s^2 。

2) 舱体边界条件

静力学仿真的计算目标为一体罐隔振器在重力作用下的静力位移，因此需将舱体视为固支的基体，为其施加“完全固定”的边界条件。

3) 一体式气罐边界条件

对于倾斜工况，本研究通过将有限元模型倾斜至不同角度计算对比一体罐隔振器的静力位移响应。

对于摇摆工况，本研究为潜艇基体施加绕一体式气罐中心的摇摆位移边界，考察一体罐隔振的位移响应。

2.2.2. 仿真参数设置

本文中使用的模型参数由供应商提供，如表 1 所示。

Table 1. Model parameters

表 1. 模型参数

参数名称		参数值
一体式气罐质量		45 t
一体罐隔振器静刚度	横向	3.1 kN/mm
	垂向	5.2 kN/mm

3. 静力学仿真

通过在 Abaqus 软件中设置分析步及位移响应输出，本文获得了一体罐隔振器在不同工况下的位移响应结果。

3.1. 倾斜工况分析

当一体罐隔振系统处于不同倾斜角度时，将一体罐从隔振器未压缩位置释放。罐体在重力作用下压缩隔振器，通过一段时间的振荡达到平衡状态，此过程中一体罐隔振器的位移响应如图 4 所示。图中平衡段为一体罐隔振器的位移响应结果，一体罐隔振器位移结果如表 2 所示。

Table 2. Displacement of integrated tank vibration isolator under inclined working condition

表 2. 一体罐隔振器倾斜工况位移

倾斜工况	x 向位移	y 向位移	z 向位移
水平放置	0	-21.22	0
纵倾 30°	0	-24.82	6.23
纵倾 90 度	0	-35.60	0
横倾 90 度	0	-35.60	0

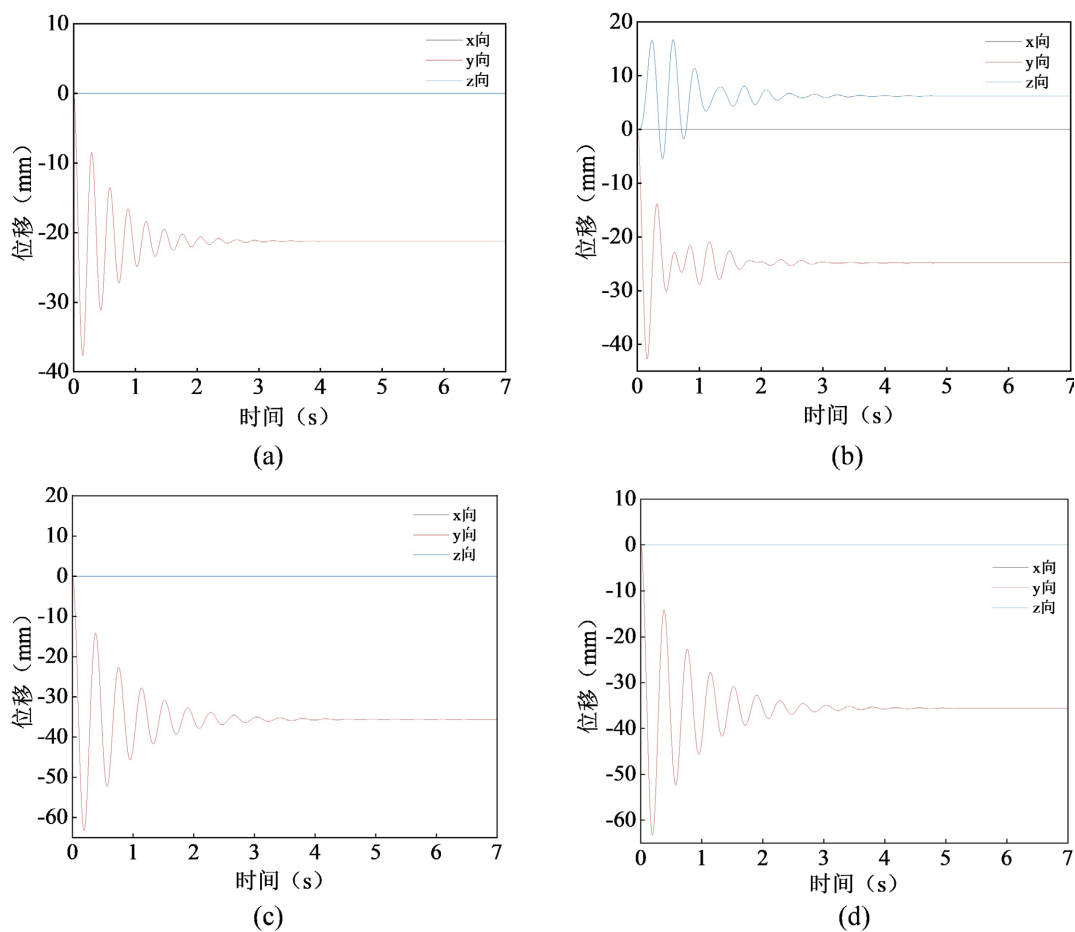


Figure 4. Displacement response curves at different inclination angles: (a) Displacement response curve in horizontal placement; (b) Displacement response curve at a trim angle of 30°; (c) Displacement response curve at a trim angle of 90°; (d) Displacement response curve at a heel angle of 90°

图 4. 不同倾斜角度下的位移响应曲线: (a) 水平放置位移响应曲线; (b) 纵倾 30°位移响应曲线; (c) 纵倾 90°位移响应曲线; (d) 横倾 90°位移响应曲线

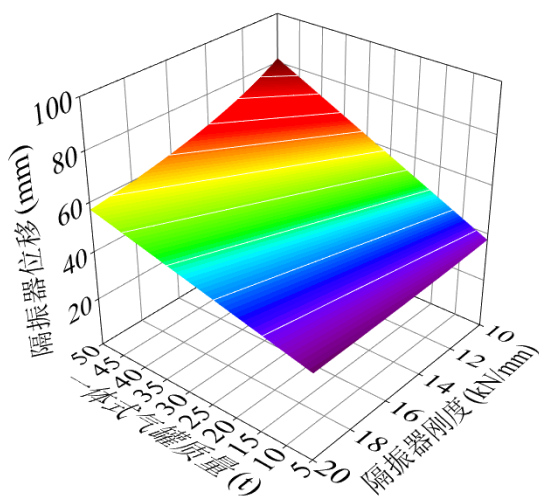


Figure 5. Surface plot of mass-stiffness-displacement response

图 5. 质量 - 刚度 - 位移响应曲面图

弹簧-阻尼系统的位移响应结果主要受系统质量和弹簧刚度的影响,因此本文将一体罐隔振器的刚度与一体式气罐的质量作为自变量,通过静力学仿真获取了一体罐隔振器的位移响应结果,如图5所示。此结果对于有限安装空间下的隔振器刚度设计具有重要的指导意义。

3.2. 摇摆工况分析

经过仿真分析,本文可获得法兰中心测点处的三向位移响应以代表一体罐隔振器的位移响应,通过矢量运算得出法兰中心测点与法兰刚性位移测点的相对位移值,此结果能够表明一体式气罐偏离出理论安装位置的位移量。本文使用的摇摆工况为:纵摇(绕x轴) $\pm 20^\circ$,周期8秒;横摇(绕z轴) $\pm 35^\circ$,周期8秒。

经过静力学仿真求解,本文获得了气罐测点处的相对位移响应曲线,如图6所示。

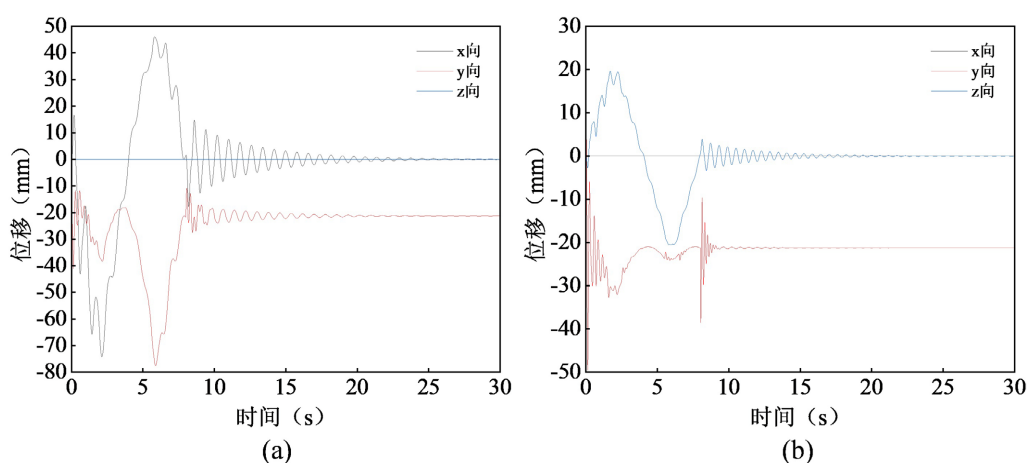


Figure 6. Displacement response under swinging condition: (a) Roll displacement response curve; (b) Pitch displacement response curve

图 6. 摇摆工况位移响应: (a) 横摇位移响应曲线; (b) 纵摇位移响应曲线

由摇摆工况下的位移响应数据可得,在横摇(绕z轴)与纵摇(绕x轴)工况下,一体式气罐结束摇摆回到平衡位置时的y向位移分别为-21.2738 mm与-21.2509 mm,与倾斜工况中水平位置时的静力位移结果相同。在摇摆工况中气罐测点的相对位移最大幅值如表3所示。

Table 3. Maximum displacement amplitude under swinging condition

表 3. 摇摆工况下的最大位移幅值

工况	x 向幅值/mm	y 向幅值/mm	z 向幅值/mm
横摇	74.241	77.516	0
纵摇	0	49.5397	20.561

由上表数据可知,在横摇工况下一体式气罐的位移幅值较大,其中x向与y向最大位移幅值为74.241 mm与77.516 mm,由于z向不参与运动,故位移值为0 mm。同理在纵摇工况下,x向不参与运动,y向与z向最大位移幅值为49.5397 mm与20.561 mm。在考虑摇摆工况下的安装干涉问题时需综合考量不同摇摆状态下的最大位移幅值,设置大于最大位移幅值的安装空隙,本研究的结果对于预测摇摆工况下舱体与一体式气罐的安装干涉具有重要的工程应用价值。

4. 倾斜工况理论验证

若一体罐隔振器静刚度已知，可通过胡克定律计算出隔振器平衡位置处的各向位移。

由胡克定律可知：

$$F = ku \quad (1)$$

其中， F ——弹性体所受力的大小； k ——弹性系数； u ——物体的形变位移。

横倾 30° 放置时，隔振器 YOZ 平面上的受力如图 7 所示。

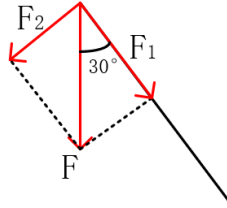


Figure 7. Force decomposition under 30° inclination in x -direction
图 7. x 向倾斜 30° 受力分解

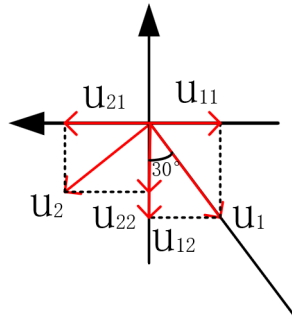


Figure 8. Displacement decomposition and synthesis
图 8. 位移分解合成

将隔振器所受气罐重力分别分解为隔振器垂直刚度与 z 向刚度方向 F_1 与 F_2 ，其中，

$$F_2 = F \cdot \sin 30^\circ = 225000 \text{ N} \quad (2)$$

故由上式可计算出隔振器在其垂直刚度方向与 z 向刚度方向的位移，如下：

$$u_1 = \frac{F_1}{k_1} = \frac{389711.4317}{5200 \cdot 4} = 18.7361 \text{ mm} \quad (3)$$

$$u_2 = \frac{F_2}{k_2} = \frac{225000}{3100 \cdot 4} = 18.1452 \text{ mm} \quad (4)$$

将隔振器的 y 向刚度方向与 x 向刚度方向位移分解至地面坐标系的垂直于水平方向，如图 8 所示。

$$u_{11} = u_1 \cdot \sin(30^\circ) = 9.36805 \text{ mm} \quad (5)$$

$$u_{12} = u_1 \cdot \cos(30^\circ) = 16.2259 \text{ mm} \quad (6)$$

$$u_{21} = u_2 \cdot \sin(60^\circ) = 15.7142 \text{ mm} \quad (7)$$

$$u_{22} = u_2 \cdot \cos(60^\circ) = 9.07265 \text{ mm} \quad (8)$$

故相对于地面坐标系，隔振器的 z 向位移为

$$U_1 = u_{21} - u_{11} = 6.3462 \text{ mm} \tag{9}$$

隔振器的 y 向位移为

$$U_2 = u_{12} + u_{22} = 25.2986 \text{ mm} \tag{10}$$

由于 y 向位移方向指向地面坐标系负向，故位移量为负值。

对于不同的倾斜角度，可使用上述案例中的过程计算得到一体罐隔振器的理论变形量，本文选取了部分特殊角度进行位移响应的结果对比，平衡状态隔振器形位移量对比表如表 4 所示。

Table 4. Comparison of simulation and theoretical displacement results
表 4. 仿真与理论位移结果对比

倾斜位置		水平放置	纵倾 30°	纵倾 90°	横倾 90°
x 向	仿真结果	0	0	0	0
	理论计算	0	0	0	0
y 向	仿真结果	-21.22	-24.81	-35.60	-35.60
	理论计算	-21.63	-25.29	-36.29	-36.29
z 向	仿真结果	0	6.22	0	0
	理论计算	0	6.34	0	0

5. 结论

为准确研究一体罐隔振器的静力特性，本文使用有限元软件 Abaqus 对一体罐隔振器的倾斜与摇摆工况进行仿真，开展了系统全面的分析并对部分仿真结果进行了理论验证工作，得出以下结论：

- 1) 倾斜工况下，一体罐隔振器的各向极限位移结果出现在水平放置、纵倾 90°、横倾 90°，三种工况下，通过计算获得的位移数据可以准确指导一体罐隔振器的设计与安装工作。
- 2) 通过理论计算，验证倾斜工况下的一体罐隔振器位移，数据表明仿真结果与理论结果误差较小，验证了本文所提出的静力学仿真方法的准确可靠性。
- 3) 摇摆工况下，一体罐隔振器在舱体摆动过程中会产生明显的位移响应，舱体摆动停止后，一体罐的位移响应能够在一体罐隔振器作用下被大幅限制，保证一体式气罐的上舰安全性。

值得注意的是，本研究主要聚焦于一体罐隔振器在准静态的倾斜与规则摇摆工况下的响应分析，存在一定的局限性。首先研究未考虑更为复杂的随机波浪引起的多频耦合激励。其次，仿真分析基于线性的材料本构关系和理想边界条件，未能充分模拟极端载荷下隔振材料可能出现的非线性、大变形及疲劳失效问题。未来值得从复杂动态载荷、非线性特性建模以及多场耦合分析的角度对当前研究继续进行深入探索。

参考文献

- [1] 李杨, 黄修长, 苏智伟, 等. 一种小动静比橡胶隔振器仿真与试验[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(2): 256-260.
- [2] 刘雪莱, 韩愈琪, 江健, 等. 液压阻尼型橡胶隔振器动态特性建模方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(17): 160-165.
- [3] 韩愈琪, 刘雪莱, 上官文斌. 基于本构神经网络橡胶隔振器动态特性建模[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 265-270.
- [4] 彭云强, 贾东, 钟卫洲, 韦利明. 金属橡胶减振器准静态加载力学性能研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11):

- 2666-2674.
- [5] Dong, G., Zhang, X., Xie, S., Yan, B. and Luo, Y. (2017) Simulated and Experimental Studies on a High-Static-Low-Dynamic Stiffness Isolator Using Magnetic Negative Stiffness Spring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **86**, 188-203. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.09.040>
 - [6] Zheng, Y., Shangguan, W., Yin, Z. and Liu, X. (2023) Design and Modeling of a Quasi-Zero Stiffness Isolator for Different Loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **188**, Article 110017. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.110017>
 - [7] Fan, H., Yang, L., Tian, Y. and Wang, Z. (2020) Design of Metastructures with Quasi-Zero Dynamic Stiffness for Vibration Isolation. *Composite Structures*, **243**, Article 112244. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112244>
 - [8] Coja, M. and Kari, L. (2021) Using Waveguides to Model the Dynamic Stiffness of Pre-Compressed Natural Rubber Vibration Isolators. *Polymers*, **13**, Article 1703. <https://doi.org/10.3390/polym13111703>
 - [9] Liu, Y., Liu, J., Pan, G. and Huang, Q. (2023) Modeling and Analysis of a Metal Rubber Vibration Isolation System Considering the Nonlinear Stiffness Characteristics. *Review of Scientific Instruments*, **94**, Article 015105. <https://doi.org/10.1063/5.0118415>
 - [10] 涂春潮, 陈子昂, 张雪颂, 等. 惯性导航用氟硅橡胶减振器振动性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(5): 131-136.
 - [11] Zhang, B., Zhao, Y., You, J. and Zhang, Z. (2024) Experimental and Numerical Analysis of Rubber Isolator Dynamic Stiffness under Hydrostatic Pressure. *Ocean Engineering*, **314**, Article 119650. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119650>
 - [12] Yu, C., Yao, J., Jiao, S. and Li, D. (2025) Design and Verification of a Magnetorheological Elastomer-Based Vibration Isolator with Adjustable Stiffness. *Structures*, **75**, Article 108762. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108762>
 - [13] Dong, Z., Li, C., Li, G., Yu, D., Sun, B. and Liu, L. (2025) Analysis and Experiment of a Novel Three-Directional Vibration Isolator with Variable Damping and Stiffness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **238**, Article 113179. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.113179>