



Open Access

引用格式:陈明辉,丁建国,拜立岗,等. 新型组合弹簧隔振器的静动态性能仿真与试验 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), DOI: [10.65658/j.hndk.2025092401](https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025092401).

Citation: Chen Minghui, Ding Jianguo, Bai Ligang, et al. Simulation and experimental investigation on the static and dynamic performance of a novel combined spring isolator[J]. Natural Science of Hainan University, DOI: [10.65658/j.hndk.2025092401](https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025092401).

新型组合弹簧隔振器的静动态性能仿真与试验

陈明辉¹, 丁建国²✉, 拜立岗^{2,3}, 江 民⁴

(1. 南京理工大学 安全科学与工程学院(应急管理学院), 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学 物理学院, 江苏 南京 210094; 3. 中国电子系统工程第二建设有限公司, 江苏 无锡 214135; 4. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 针对半导体精密设备面临环境微振动干扰, 以及现有空气弹簧存在承载力不足与金属螺旋弹簧隔振性能差的问题, 将金属螺旋弹簧的高承载力与空气弹簧的高隔振效率相结合, 构建了更具优势的新型组合弹簧隔振器。借助 ANSYS Mechanical/Fluent 有限元软件, 通过流固耦合方法计算该组合弹簧的垂向静刚度和动刚度, 剖析初始气压与金属螺旋弹簧结构参数(线径、中径和有效圈数)对其性能的影响规律。同时, 对相关参数开展敏感性分析与误差评估, 以量化各参数在环境微振动条件下对隔振效率的影响程度。通过对比试验结果与仿真数据, 验证了所建模型的合理性。结果表明: 初始气压和金属螺旋弹簧线径对组合弹簧的垂向静刚度影响显著, 而金属螺旋弹簧中径和有效圈数的影响相对较小; 在环境微振动下的参数敏感性分析中, 各因素影响程度由高至低依次为初始气压、线径、中径和有效圈数; 采用线径为 4 或 5 mm 的组合弹簧, 隔振后的振动水平可满足 VC-C 标准; 单独使用空气弹簧时, 其隔振性能仅满足 VC-D 标准。

关键词: 空气弹簧; 金属螺旋弹簧; 环境微振动; 垂向刚度; 有限元分析

中图分类号: U463.33+4 文献标志码: A

DOI: [10.65658/j.hndk.2025092401](https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025092401) CSTR: 32403.14.hndk.2025092401

Simulation and experimental investigation on the static and dynamic performance of a novel combined spring isolator

Chen Minghui¹, Ding Jianguo²✉, Bai Ligang^{2,3}, Jiang Min⁴

(1. School of Safety and Engineering(School of Emergency Management), Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 3. China Electronics System Engineering No.2 Construction Co., Ltd., Wuxi 214135, China; 4. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Environmental micro-vibration is a critical factor affecting the performance of semiconductor manufacturing and measurement equipment, and its control has become a complex and challenging issue in the field of modern precision engineering. Air springs are widely used in micro-vibration isolation due to their adjustable natural frequency and excellent low-frequency vibration isolation performance, but their load-

Received: 2025-09-24; Revised: 2026-03-30; Accepted: 2026-04-08.

✉ Corresponding author(s): Ding Jianguo, E-mail: nustdjg@163.com.

bearing capacity is limited. In contrast, metal coil springs have high load-bearing capacity but relatively poor vibration isolation performance. To address this, we develop a novel metal-air combined spring isolator to integrate the high load-bearing capacity of metal coil springs with the high vibration isolation efficiency of air springs. Based on the ANSYS Mechanical/Fluent finite element software, this study employs a fluid-structure interaction method to calculate the vertical static and dynamic stiffnesses of the combined spring. Additionally, the influence of initial air pressure and the structural parameters of the metal coil spring (wire diameter, mean diameter, and number of active coils) on its performance is analyzed. Furthermore, parameter sensitivity analysis and error evaluation are conducted to quantify the impact of each parameter on vibration isolation efficiency under environmental micro-vibration. The validity of the established model is verified by comparing simulation with experimental results. The research indicates that the initial air pressure and the wire diameter of the metal coil spring have a significant influence on the vertical static stiffness of the combined spring, while the influence of the mean diameter and the number of active coils of the metal coil spring is relatively minor. In the parameter sensitivity analyses under environmental micro-vibration, the parameters are ranked in descending order of influence as follows: initial air pressure, wire diameter, mean diameter, and number of active coils. In terms of vibration isolation performance, when combined springs with wire diameters of 4 mm and 5 mm are respectively used, the isolation vibration level can meet the VC-C standard. In contrast, when an air spring is used alone, its vibration isolation performance can only meet the VC-D standard.

Keywords: air spring; metal coil spring; environmental micro-vibration; vertical stiffness; finite element analysis

0 引言

环境微振动是指由自然因素和人为活动引起的地面振动,具有振幅小、频率低(通常为 0.1 ~ 10.0 Hz)的连续振动特征^[1-2]。就普通建筑而言,此类振动可忽略不计;然而,在高精尖科技领域,环境微振动却是影响性能的关键要素。空气弹簧凭借其低固有频率、高隔振效率以及主动调平能力,已成为精密仪器、半导体制造和科学研究等领域隔离环境微振动的核心解决方案^[3-4]。空气弹簧的动态刚度可通过调节初始内压与激励频率来实现低刚度输出^[5],具备整体刚度可调性强、隔振效果良好的特点,但承载力存在一定局限。金属螺旋弹簧的优势在于其具有较大的承载力,同时具备较高的刚度,但其刚度不可调节,导致隔振效果不佳。为同时达成高负载与低隔振频率的目标,可将空气弹簧与金属螺旋弹簧整合为一体,构建优势互补的组合隔振系统。

金属-空气组合弹簧作为新型弹性元件,融合了金属材料的结构强度与空气介质的可压缩特性,在静态承载、动态减振与能量吸收等方面表现出独特的优势。随着高端制造与精密工程的快速发展,对隔振元件的负载能力、低频隔振性能与稳定性提出了更高要求,组合弹簧也因此成为满足复杂工况下高性能隔振需求的重要技术途径。

国内外学者运用多种方法对空气弹簧和金属螺旋弹簧的力学特性展开研究。Mendia-García 等^[6]借助有限元软件 ABAQUS,探究了高频率范围内空气弹簧的动力学行为,以及结构振动传递对气动悬架轴向动刚度的影响。董军哲等^[7]利用 ABAQUS 软件,对空气弹簧的静刚度特性进行了深入的仿真分析,为空气弹簧的工程设计提供了一种高效、可靠的数字化分析手段,有效降低了对物理样机和试验的依赖。邬明宇等^[8]提出了一种基于热力学多腔室空气弹簧动刚度理论模型,并通过试验验证了模型的可行性。王姣扬等^[9]利用有限元软件 ANSYS,分析了变刚度螺旋弹簧关键几何参数(线径、节距和有效圈数)对其力学性能的影响规律。Jiang 等^[10]通过试验法研究了金属弹簧在大变形下的非线性力学特性,获取了金属弹簧在大变形下的刚度、应力分布和失效行为。Renno^[11]提出了一种新颖且严谨的解析方法,将波传播和传递矩阵法的优势与对弹簧非均匀端部的精确建模相结合,显著地提升了螺旋弹簧的振动建模精度。

本文针对新型组合弹簧,利用 ANSYS Mechanical/Fluent 构建不同金属螺旋弹簧尺寸的组合弹簧隔振器的流固耦合(FSI)模型,通过模拟结果与试验结果的对比,验证模型的可靠性,计算其垂向静刚度和动刚度,得出不同工况下、不同金属螺旋弹簧尺寸的组合弹簧垂向静刚度和动刚度的规律,并对其影响因素进行敏感性分析。旨在为金属-空气组合弹簧隔振器的优化设计提供参考。

1 新型组合弹簧模型结构

1.1 三维模型 新型组合弹簧隔振器由空气弹簧内部嵌入金属螺旋弹簧构成。空气弹簧由上盖板、下盖板和中间的橡胶气囊组成,其内部充入惰性气体。上盖板和下盖板的作用是将空气弹簧固定于振动台体和支承之间,二者采用不锈钢材质,起到固定支撑作用。空气弹簧的柔性部分主要为外囊部分,该部分主要由橡胶和帘线构成,对空气弹簧的承载力和耐久性起着决定性作用。通过在空气弹簧的上下盖板中间嵌入金属螺旋弹簧,可得到组合弹簧隔振器模型。空气弹簧的缓冲吸收性能依赖于气体可压缩性、结构柔性和阻尼特性的协同效应,而钢弹簧缓冲的核心机理主要来源于弹性变形储能、有限阻尼特性和疲劳寿命限制。该组合弹簧的几何模型和几何结构如图 1 所示。空气弹簧的具体结构参数:空气弹簧上下盖板边长为 225 mm,厚度为 16 mm 且视作刚体,上盖板方柱边长为 45 mm,下盖板方框边长为 80 mm,橡胶气囊壁厚为 3 mm,气囊的等效弹性模量为 46.2 MPa,气囊内部气体压强为 0.7 MPa。

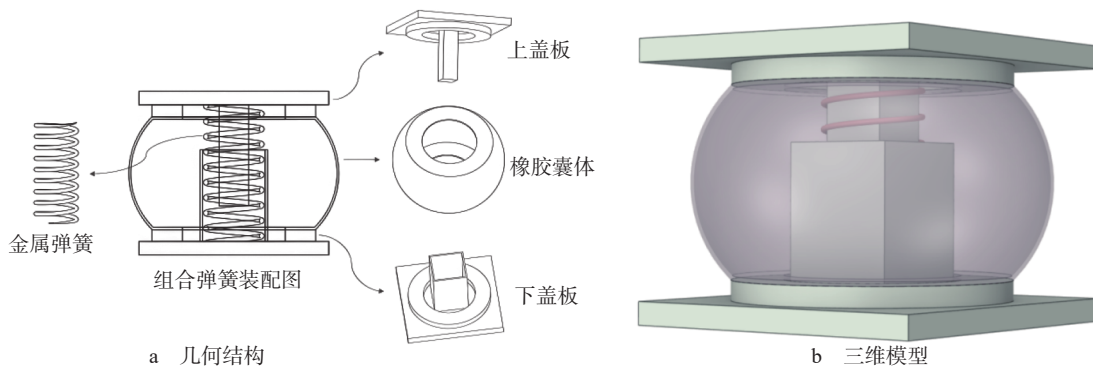


图 1 新型组合弹簧的整体结构

在空气弹簧运行过程中,上下盖板基本不发生变形,可视为刚体,橡胶外囊为通过内外橡胶与中间帘线层硫化制成的分层复合材料。在空气弹簧的模拟仿真阶段,因气囊挠曲,其变形幅度较大,该变形属于非线性问题。当气囊处于工作状态时,载荷施加于上盖板,会致使气囊内部气体压力与气体体积产生变化。与此同时,上下盖板与气囊保持接触状态。鉴于需要考虑囊体内流体域的气压分布,以及外部结构受力与变形之间的相互影响,在研究中需运用流固耦合(fluid-structure interaction,FSI)方法。

1.2 网格划分与边界条件 运用 ANSYS 的 Mesh 模块对所构建的三维模型实施网格划分。鉴于金属螺旋弹簧线径较小,而空气弹簧尺寸较大,综合考虑网格数量和网格质量,决定对组合弹簧采用四面体网格划分方式。针对固体域部分,使用 SOLID187 单元进行划分;流体域使用系统默认的流体单元进行划分。固体域网格数量为 85 833 个,流体域网格数量为 54 154 个,网格平均质量为 0.88。固体域和流体域网格情况如图 2 所示。

气囊与上下盖板交界面设置为绑定接触,金属螺旋弹簧与上下盖板的接触面也设置为绑定接触。由于组合弹簧在受压过程中,其内部的囊体和金属螺旋弹簧均会与流体接触面产生较大变形,因此需将金属螺旋弹簧与囊体内部和流体的接触面设置为 FSI 界面,囊体的内外表面采用自适应接触,下盖板底部设置为固定约束。

在 ANSYS 中对组合弹簧 FSI 问题进行模拟时,需将腔内气体的黏性设置为层流,而非湍流^[12]。层流与湍流的分界主要由雷诺数 Re 判定,由于空气弹簧内部气体流速缓慢、特征尺寸较小,雷诺数 Re 低于临界值 2 300,流动处于层流状态。空气弹簧的振动幅度较小、频率较低,流动惯性效应较弱,不易触发湍

流。在 Fluent 中,层流模型仅需求解 Navier-Stokes 方程的直接黏性项,无需引入湍流模型(如 $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 等),能够显著减少计算量,提高计算效率,适用于复杂的 FSI 计算。

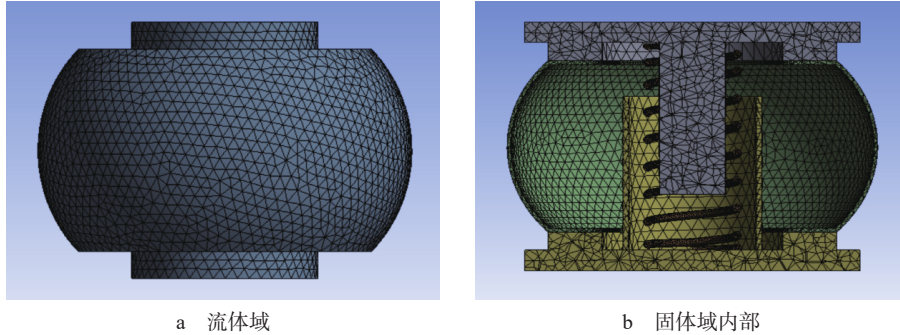


图2 新型组合弹簧固体域和流体域网格

1.3 流场数值模拟 组合弹簧内部气体的流动本质上属于流体流动与换热问题。当组合弹簧承受外部荷载时,气囊内的气体被压缩,压力随之升高;卸载时,气体膨胀,压力降低。流体流动是一种复杂的物理现象,其流场的建模与数值模拟过程更为复杂。鉴于研究重点与工况特点,在本次模拟计算中,温度变化被设定为可忽略不计的因素。流体运动满足质量守恒与动量守恒方程,同时遵循气体状态方程^[13]。

FSI 是多学科交叉领域的核心问题与难点,以空气弹簧为代表的弹性薄壁构件的工作机理是该问题的典型范例。考虑囊内流体域的气压分布与流体-固体交界面变形的相互影响,运用 ANSYS Mechanical 与 Fluent 软件进行双向流固耦合分析。守恒定律是 FSI 问题中支配各类变量行为的基本原则^[14],本文不考虑组合弹簧温度与热量变化,以确保物理场的连续性。

1.4 网格无关性验证 在 ANSYS 仿真过程中,计算精度与收敛稳定性不仅与固体结构及流体域的几何建模精度存在密切关联,而且取决于网格的质量、密度以及拓扑结构。尽管网格数量能够提高局部流场与结构应力的计算精度,但会大幅延长计算时长、占用硬件资源,甚至可能因迭代步数过多而引发数值发散问题,进而降低整体计算效率,网格数量过少则会导致计算结果的准确性下降。因此,有必要开展网格无关性验证,旨在实现计算精度与计算成本之间的最优平衡。

为验证所构建模型计算结果的有效性,并判断其计算效率是否达到优异,对所选择的组合弹簧模型进行网格无关性研究。采用具有不同流体和固体结构网格密度的网格模型,对组合弹簧的垂向静刚度进行计算,结果如图3所示。由图3可知,当网格数量大于 120 000 个,达到一定阈值后,仿真结果的差异约为 5%,由此可判定 FSI 模型的网格数量合理。

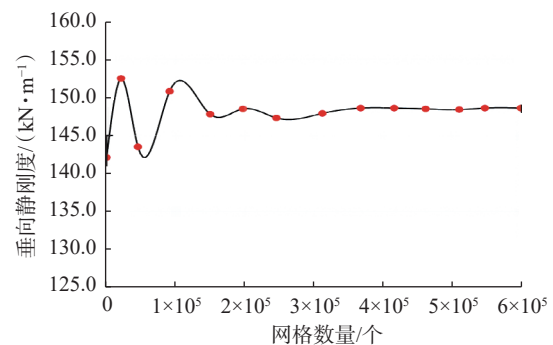


图3 网格无关性验证

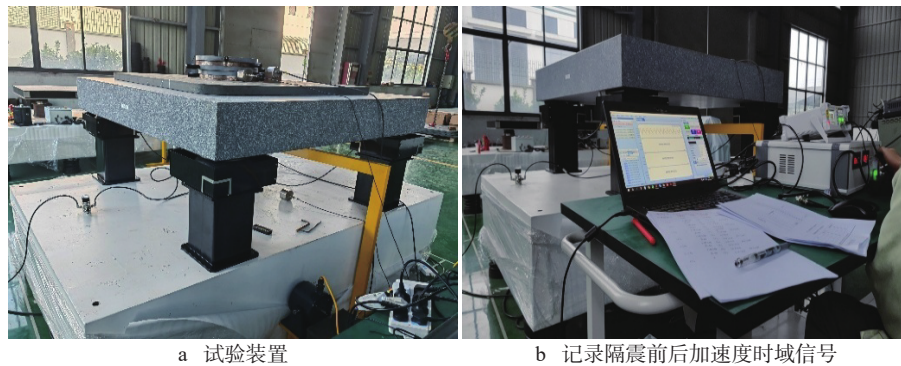
2 新型组合弹簧流固耦合模型试验验证

对空气弹簧开展静刚度特性试验、动刚度特

性试验和环境微振动响应试验。试验所用仪器主要包括 YY550-30 无油静音箱式空气压缩机(用于供气)、SMC-AW20-M5-A 调压阀、XL-200 功率放大器、PCB HT378B02 加速度传感器(用于测量振动)、FY6900 双通道 DDS 函数任意波形信号发生器(用于记录)、Spider-20 动态分析仪、XLMS 电动式模态激振器、Post Analyzer 信号采集及处理软件。

为验证组合弹簧 FSI 模型的合理性和适用性,选取本研究团队完成的空气弹簧静刚度和动刚度试验数据^[15],与仿真计算结果进行分析对比。对比加速度正弦激励下组合弹簧的试验与仿真结果,在组合弹簧模型上施加环境微振动加速度波,检测组合弹簧上盖板某一点的加速度响应,并将其与组合弹簧在环

境微振动下的试验结果进行对比, 正弦激励试验现场如图 4 所示。

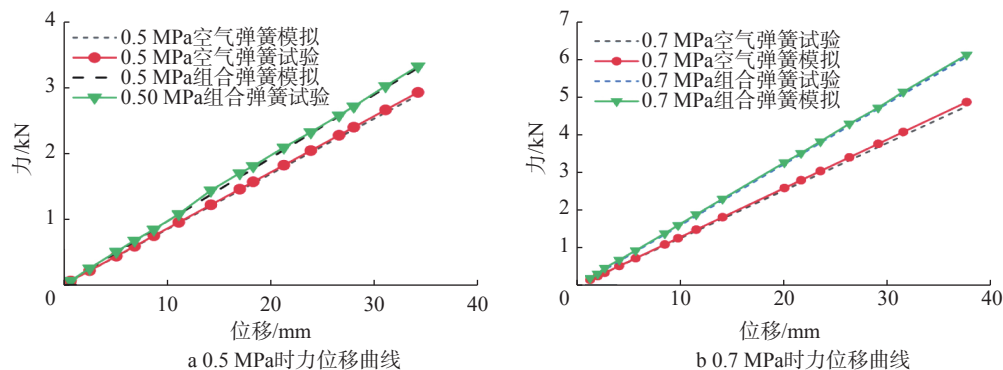


a 试验装置

b 记录隔震前后加速度时域信号

图 4 组合弹簧正弦激励试验现场

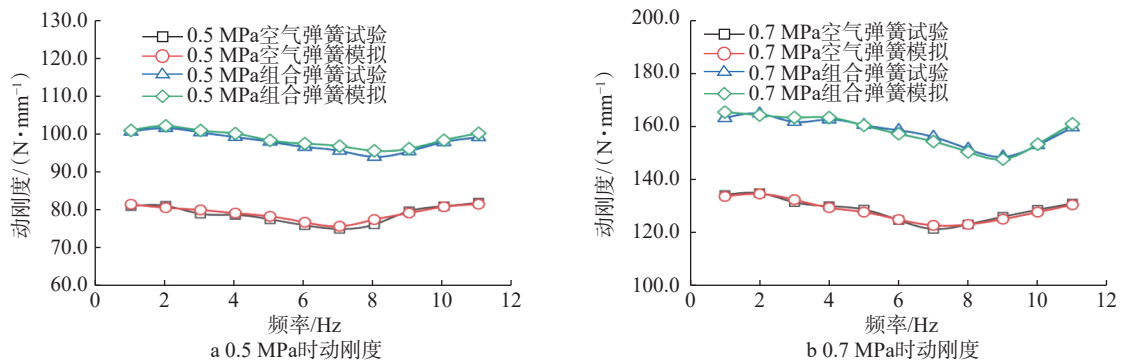
通过对空气弹簧和组合弹簧在 0.5 和 0.7 MPa 气压条件下开展静刚度和动刚度仿真计算, 分析静刚度和动刚度的变化情况, 并将其与试验结果进行对比, 如图 5 和图 6 所示。



a 0.5 MPa 时力位移曲线

b 0.7 MPa 时力位移曲线

图 5 静刚度试验与仿真对比



a 0.5 MPa 时动刚度

b 0.7 MPa 时动刚度

图 6 动刚度试验与仿真对比

由图 5 可知, 随着外力荷载的增加, 组合弹簧和空气弹簧的位移呈近似线性的增大趋势, 空气弹簧和组合弹簧的模拟结果与试验结果的对比误差均控制在 10% 以内。对比空气弹簧和组合弹簧在 0.5 和 0.7 MPa 气压下的模拟结果发现, 组合弹簧在 0.5 和 0.7 MPa 气压下的静刚度性能更优, 表明组合弹簧相较于空气弹簧具有更大的承载力, 适用于更多的实际应用场景。

由图 6 可知, 空气弹簧的仿真动刚度和试验动刚度在 0.5 MPa 气压条件下的最大误差为 5.4%, 在 0.7 MPa 气压条件下的最大误差为 6.7%。当初始气压为 0.7 MPa 时, 组合弹簧的动刚度在 9.0 Hz 之后呈现增大趋势, 而空气弹簧在 7.0 Hz 后呈增大趋势, 且二者动刚度变化趋势均为先减小后增大。其原因在于, 在低频阶段, 空气弹簧内部气体的可压缩性占据主导地位, 而当频率达到 7.0 Hz 之后, 气体的惯性效应开始显著显现, 进而导致动刚度呈现增大趋势。通过上述静刚度与动刚度试验数据和模拟数据对比可

知,误差低于 10%,说明 FSI 模型具有合理性。

为验证组合弹簧 FSI 模型的合理性和适用性,对组合弹簧模型施加正弦激励,仿真分析计算值与试验值的对比结果如图 7 所示。在 6~8 s 的区间段内,仿真结果的加速度峰值为 $6.15 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,试验结果的加速度峰值为 $5.89 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,误差为 4.23%,误差在 10% 以内,表明所建立的 FSI 模型具有合理性。

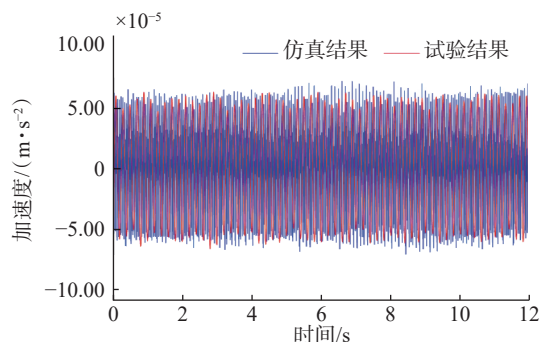


图 7 正弦激励下试验和仿真结果

3 新型组合弹簧垂向刚度影响因素分析

3.1 初始气压对垂向静刚度和动刚度的影响 在建立的 FSI 模型基础上,确保金属螺旋弹簧尺寸不变,计算组合弹簧在不同初始气压(0.4~0.6 MPa)条件下的垂向静刚度特性,进而分别剖析在不同频率外力作用时,初始气压为 0.5~0.7 MPa 情形下的垂向动刚度特性。

在已建立的模型中,将下端固定,通过在组合弹簧上盖板表面分别施加静载荷和动载荷,通过监测上盖板某一节点的位移,可计算出组合弹簧的静刚度和动刚度,最终得到的静刚度和动刚度如图 8 所示。

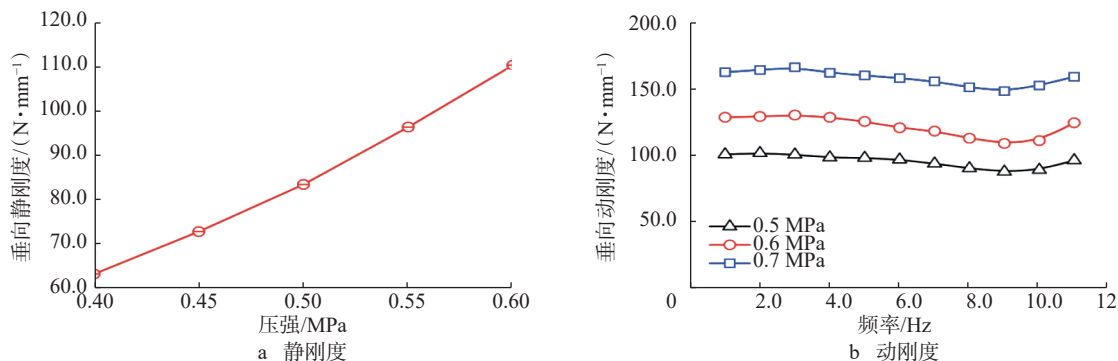


图 8 不同初始气压对组合弹簧垂向刚度特性影响

当初始气压从 0.4 MPa 提升至 0.6 MPa 时,垂向静刚度由 $63.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加到 $111.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,表明初始气压对组合弹簧的垂向静刚度具有显著影响。从初始气压分别为 0.5~0.7 MPa 时的动刚度曲线可知,当初始气压发生变化时,动刚度的变化趋势保持不变,初始气压为 0.7 MPa 时的动刚度是初始气压为 0.5 MPa 时动刚度的 1.8 倍。调节初始气压能够改变组合弹簧的静刚度。当初始气压升高时,组合弹簧内部压缩空气的体积模量增大,抵抗变形的能力增强,进而导致静刚度增大。通过改变初始气压来调节组合弹簧的刚度,可以改变组合弹簧的承载力,使其适用于更多的应用场景。

3.2 螺旋弹簧线径对垂向静刚度和动刚度的影响 为满足组合弹簧优化之需求,在确保其他因素不变的条件下,剖析金属螺旋弹簧线径对组合弹簧垂向刚度的影响。通过计算不同金属螺旋弹簧线径情形下组合弹簧的静刚度和动刚度,获取不同线径对应的静刚度和动刚度曲线,如图 9 所示。

当螺旋弹簧线径从 1 mm 增大至 5 mm 时,垂向静刚度由 $81.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加至 $109.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,表明螺旋弹簧线径对组合弹簧静刚度存在一定影响,即螺旋弹簧线径越大,组合弹簧的静刚度越大。当螺旋弹簧线径从 3 mm 增大至 5 mm 时,组合弹簧动刚度的变化趋势基本保持不变。螺旋弹簧线径的改变会导致组合弹簧的动刚度大小发生变化。线径为 5 mm 时的动刚度是线径为 3 mm 时的动刚度的 1.2 倍。在激振频率大于 9.0 Hz 时,不同线径组合弹簧的动刚度呈现增大趋势。在激振频率大于 9.0 Hz 后,组合弹簧内部气体压缩和膨胀的速率加快,从而导致动刚度呈上升趋势。

3.3 螺旋弹簧中径对垂向静刚度和动刚度的影响 螺旋弹簧的中径对其刚度也存在一定影响。为探究螺旋弹簧中径对刚度的影响,在保持初始气压、螺旋弹簧线径和圈数恒定的条件下,分别选取 5 种不同的螺旋弹簧中径进行有限元分析,获取不同螺旋弹簧中径的静刚度曲线。同时,选取 3 种不同的螺旋弹簧

线径, 计算其在不同外部激振频率下的动刚度曲线, 结果如图 10 所示。

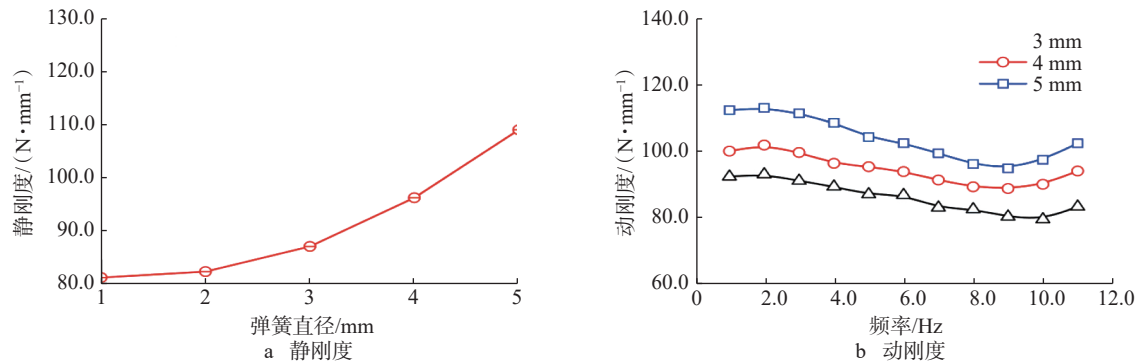


图 9 不同螺旋弹簧线径对组合弹簧垂向刚度特性影响

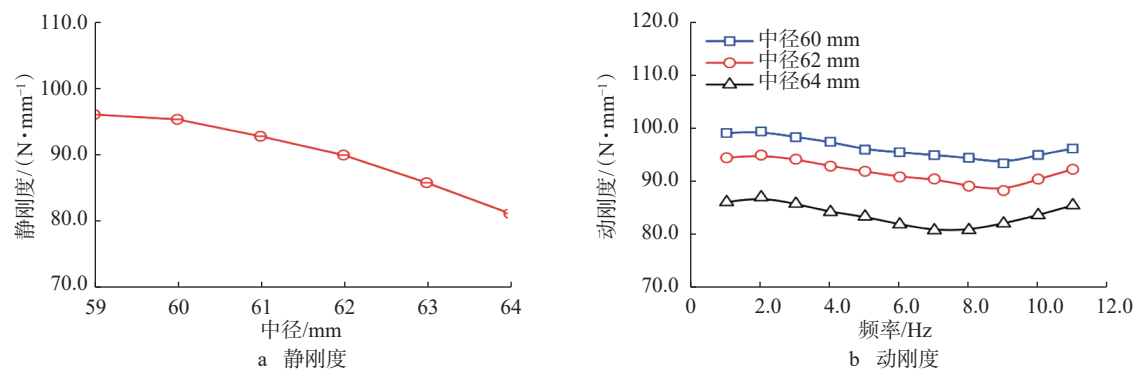


图 10 不同螺旋弹簧中径对组合弹簧垂向刚度特性影响

由静刚度曲线可知, 随着螺旋弹簧中径的增大, 组合弹簧的静刚度随之减小。中径为 60 mm 的组合弹簧静刚度是中径为 64 mm 组合弹簧静刚度的 1.2 倍, 且随着中径的增大, 静刚度减小的趋势越来越明显。从动刚度曲线可知, 随着螺旋弹簧中径的增大, 动刚度的变化并不明显, 中径为 60 mm 的组合弹簧动刚度是中径为 64 mm 组合弹簧动刚度的 1.1 倍。螺旋弹簧中径的增大, 会使螺旋弹簧刚度减小, 进而使得组合弹簧刚度变小。螺旋弹簧中径的改变会引起腔内气体容积的变化, 进而对组合弹簧腔内气体的流动产生影响, 最终导致组合弹簧动刚度减小。

3.4 螺旋弹簧圈数对垂向静刚度和动刚度的影响 螺旋弹簧的有效圈数会对其刚度产生一定程度的影响。在保持初始气压、螺旋弹簧线径和螺旋弹簧中径不变的条件下, 选取不同圈数的螺旋弹簧, 对其静刚度和动刚度进行计算, 研究螺旋弹簧圈数对组合弹簧垂向性能的影响, 结果如图 11 所示。

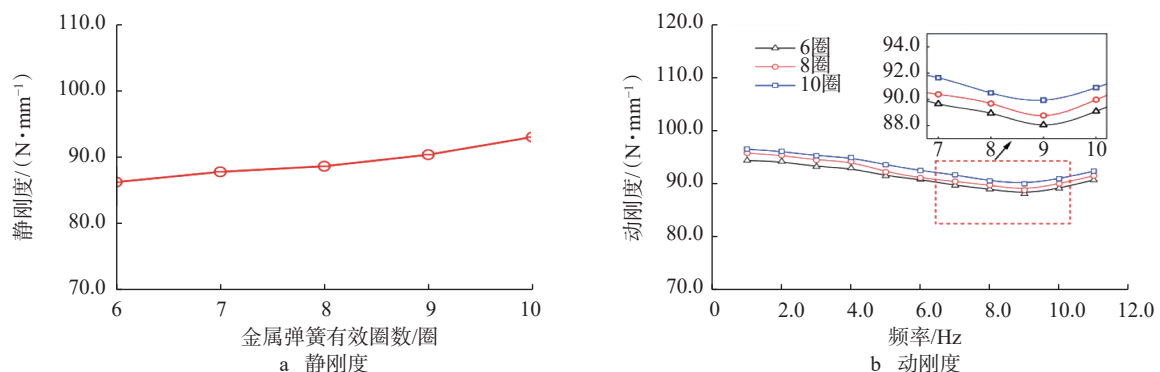


图 11 不同螺旋弹簧有效圈数对组合弹簧垂向刚度特性的影响

由静刚度曲线可知, 随着螺旋弹簧有效圈数的增加, 组合弹簧的静刚度随之增大, 意味着组合弹簧的

承载力也随之增大。当螺旋弹簧有效圈数为 6 时,组合弹簧的静刚度为 $86.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$;当有效圈数为 10 时,组合弹簧的静刚度为 $94.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。由动刚度曲线可知,随着外界频率的增大,组合弹簧的动刚度曲线在不同有效圈数下的变化趋势基本保持不变;随着有效圈数的增多,动刚度随之增大。有效圈数为 10 时的动刚度为有效圈数为 6 时的 1.05 倍。螺旋弹簧圈数增加,会导致螺旋弹簧的变形量增大;在螺旋弹簧高度确定的情况下,有效圈数的增加会使组合弹簧的刚度增大。

3.5 组合弹簧隔振效果分析 为对比组合弹簧和空气弹簧的隔振性能,通过隔振后的加速度频域响应,提取滤波后相应频带内的信号成分,以中心频率为横坐标、有效值为纵坐标,绘制速度响应的三分之一倍频程谱,如图 12 所示。

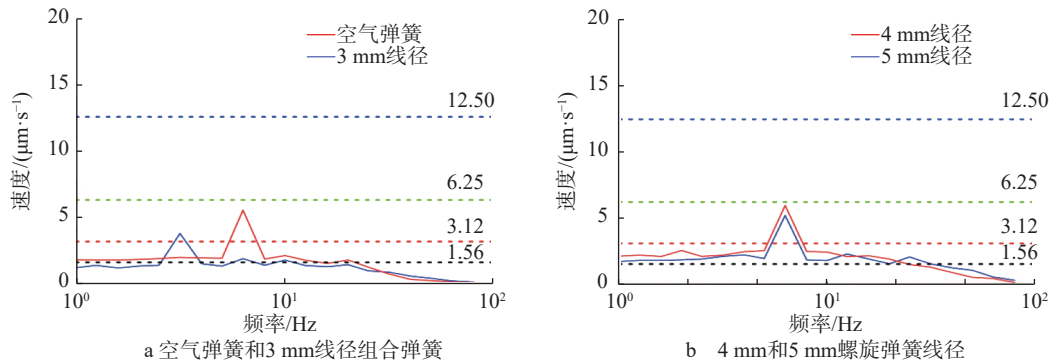


图 12 不同组合弹簧隔振后速度响应 1/3 倍频程曲线

VC 曲线作为精密工程与半导体制造领域中用于量化评估和控制环境微振动的关键标准,明确界定了不同精度等级下全频段(1 ~ 100 Hz)所允许的最大振动速度限值。由图可知,当螺旋弹簧线径为 4 mm 和 5 mm 时,组合弹簧的振动水平仅能达到 VC-C 标准,且在 12.5 Hz 频率出现峰值,这是组合弹簧发生共振导致隔振性能不佳;在高频部分,相较于低频部分,振动速度显著降低,表明高频部分的隔振性能更为优良。螺旋弹簧线径为 3 mm 的组合弹簧和空气弹簧的振动水平可以满足 VC-D 振动标准,说明螺旋弹簧刚度的增大会降低隔振水平;在低频部分,螺旋弹簧线径为 3 mm 的组合弹簧的振动速度相较于线径为 4 和 5 mm 的组合弹簧更低,说明在低频部分,前者的隔振性能更好。

从图中还可以发现,随着螺旋弹簧线径的增加,组合弹簧的刚度随之增大,低频隔振效果减弱,而高频隔振效果有所提升。由于组合弹簧刚度不同,其固有频率也存在差异,在不同频率的外界激励作用下会产生共振,具体表现为图中不同频率处出现峰值。在实际的工程应用中,可依据实际需求对螺旋弹簧的线径进行设置。

4 环境微振动下新型组合弹簧的参数敏感性分析

为进一步分析螺旋弹簧尺寸和初始气压对组合弹簧隔振率的影响程度,选取初始气压(P)、螺旋弹簧线径(d)、螺旋弹簧中径(D)和螺旋弹簧有效圈数(N)4 个因素开展三水平的正交试验,如表 1 所示。

表 1 因素水平试验表

水平	因素			
	P/MPa	d/mm	D/mm	$N/\text{圈}$
1	0.5	3	66	6
2	0.6	4	68	7
3	0.7	5	70	8

鉴于螺旋弹簧的线径、中径和圈数相互独立,为提升数据的说服力,选择对其进行 12 次试验来分析各因素对组合弹簧的影响效果。借助 ANSYS Mechanical/Fluent 软件,对新型组合弹簧平台施加环境微振

动波,该环境微振动波数据源于团队的数据^[16]。分析组合弹簧上某一节点的加速度值,得到的曲线如图13所示,试验记录表及相关结果如表2所示。

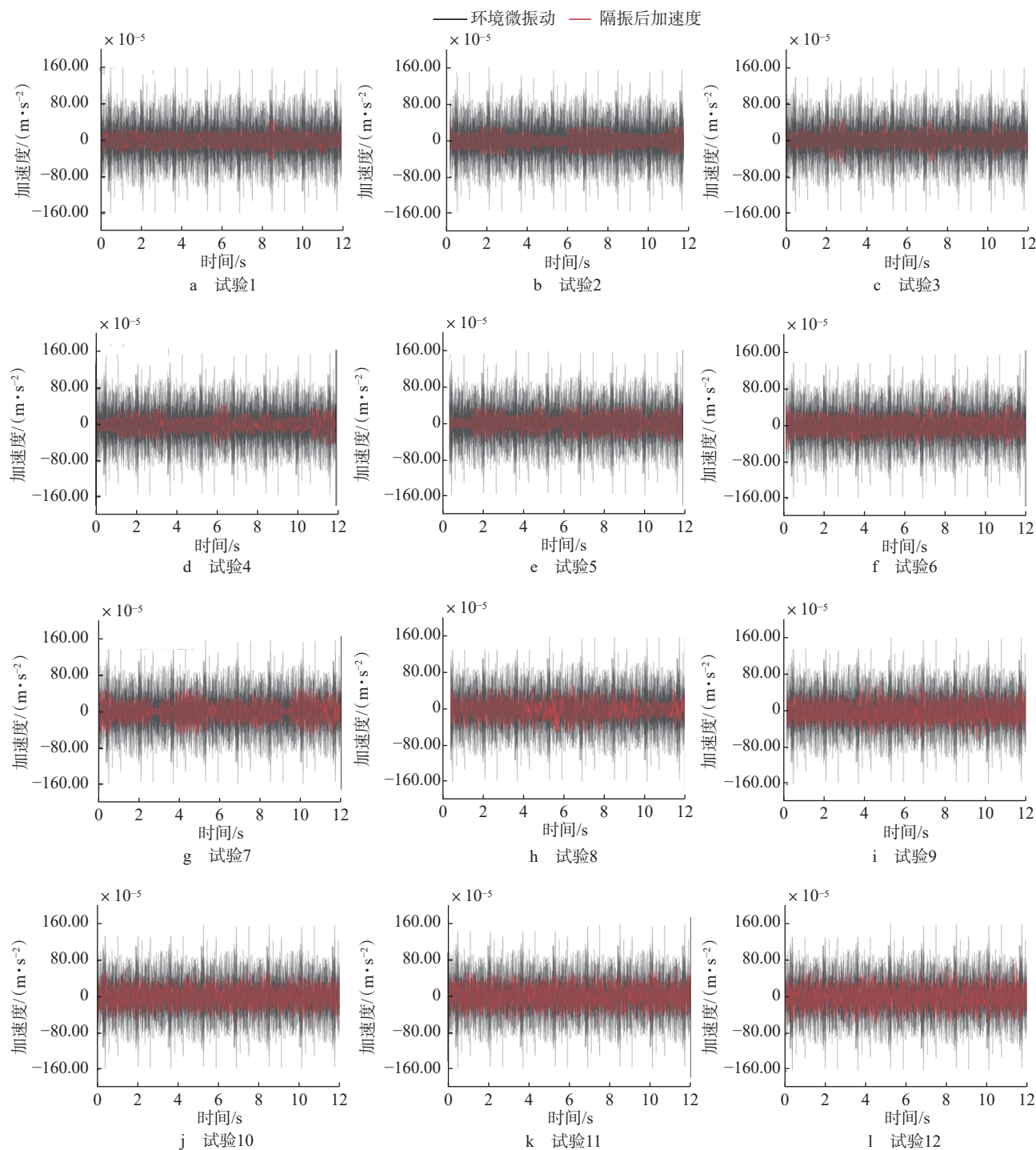


图13 不同水平在环境微振动下加速度模拟结果

根据上表得到的结果,对4个因素进行极差分析,得到结果如表3。

根据表3的极差分析结果可知,在环境微振动条件下,当以加速度峰值作为试验指标时,初始气压的极差数值最大,表明初始气压的影响程度最为显著;螺旋弹簧中径的极差数值最小,意味着螺旋弹簧中径的影响程度最弱。4个因素影响程度的先后顺序依次为初始气压、螺旋弹簧线径、螺旋弹簧圈数和螺旋弹簧中径。各因素和各水平的影响结果如图14所示。

表 2 试验设计表及加速度峰值

试验	因素				加速度峰值/ $(\times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	均一化处理
	P	d	D	N		
1	1	1	1	1	45.75	0.682
2	1	2	2	2	47.01	0.701
3	1	3	3	3	50.13	0.747
4	1	1	3	3	47.67	0.711
5	2	1	2	3	52.35	0.781
6	2	2	3	1	54.93	0.819
7	2	3	1	2	59.07	0.881
8	2	2	1	3	55.04	0.821
9	3	1	3	2	63.15	0.941
10	3	2	1	3	64.13	0.956
11	3	3	2	1	65.58	0.978
12	3	3	1	2	67.08	1.000

表 3 极差分析

极差	因素			
	P	d	D	N
K_1	0.711	0.779	0.835	0.825
K_2	0.826	0.824	0.850	0.881
K_3	0.969	0.902	0.819	0.799
R	0.258	0.123	0.031	0.082

注: K_1 、 K_2 、 K_3 分别为3个水平对应的加速度峰值的均一化结果, R 为各因素的极差。

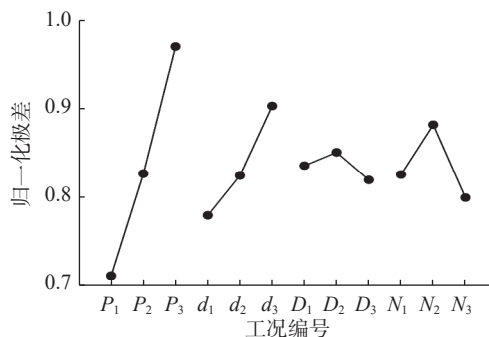


图 14 加速度峰值与各因素、各水平的关系

注: $P_1=0.5 \text{ MPa}$, $P_2=0.6 \text{ MPa}$, $P_3=0.7 \text{ MPa}$, $d_1=3 \text{ mm}$, $d_2=4 \text{ mm}$, $d_3=5 \text{ mm}$, $D_1=66 \text{ mm}$, $D_2=68 \text{ mm}$, $D_3=70 \text{ mm}$, $N_1=6 \text{ 卷}$, $N_2=7 \text{ 卷}$, $N_3=8 \text{ 卷}$ 。

5 结 论

(1) 根据所建立的组合弹簧 FSI 模型, 其仿真计算值与组合弹簧特性试验测试值的误差控制在 10% 以内, 验证了 FSI 模型的合理性。新型组合弹簧的承载力相较于原空气弹簧提高了 15% 左右。

(2) 仿真结果表明: 新型组合弹簧的垂向静刚度与初始气压、螺旋弹簧线径和有效圈数呈正相关关系, 与螺旋弹簧中径呈负相关关系; 组合弹簧的垂向动刚度呈现出先减小后增大的变化趋势; 初始气压、螺旋弹簧线径、中径和有效圈数对新型组合弹簧隔振器的隔振率的影响程度由大到小依次为初始气压、螺旋弹簧线径、螺旋弹簧圈数和螺旋弹簧中径。

(3)对组合弹簧和空气弹簧在环境微振动作用下的隔振效果开展仿真研究。结果表明:当螺旋弹簧线径增大时,低频隔振效果呈现减弱趋势,而高频隔振效果则有所增强;当螺旋弹簧线径为 4 mm 和 5 mm 时,垂向方向的振动水平可满足 VC-C 标准;当螺旋弹簧线径为 3 mm 以及无金属螺旋弹簧时,垂向方向的振动水平可满足 VC-D 标准。

参考文献:

- [1] 杨理华, 张骁, 张翔鹏, 等. 潜艇舱室环境噪声危害及治理进展研究 [J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(12): 1–5.
Yang L H, Zhang X, Zhang X P, et al. Research on environmental noise hazards and control progress in submarine cabins[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(12): 1–5.
- [2] 尹蒙蒙, 丁虎, 陈立群. X 型准零刚度隔振器动力学设计及分析 [J]. *动力学与控制学报*, 2021, 19(5): 46–52.
Yin M M, Ding H, Chen L Q. Dynamic design and analysis of X-shaped quasi-zero stiffness isolator[J]. *Journal of Dynamic and Control*, 2021, 19(5): 46–52.
- [3] 成小霞, 李宝仁, 杨钢, 等. 囊式空气弹簧刚度特性研究 [J]. *液压与气动*, 2015(10): 98–101.
Cheng X X, Li B G, Yang G, et al. Research on Cystiform air spring stiffness characteristics[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2015(10): 98–101.
- [4] Zhou X H, Zhao D X, Sun X, et al. An asymmetric quasi-zero stiffness vibration isolator with long stroke and large bearing capacity[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 108(3): 1903–1930.
- [5] Qu D, Liu X D, Liu G T, et al. Analysis of vibration isolation performance of parallel air spring system for precision equipment transportation[J]. *Measurement and Control*, 2019, 52(3/4): 291–302.
- [6] Mendia-garcía I, Facchinetti A, Bruni S, et al. Analysis and modelling of the dynamic stiffness up to 400 Hz of an air spring with a pipeline connected to a reservoir[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 557: 117740.
- [7] 董军哲, 秦喜民, 周盼, 等. 基于 ABAQUS 软件的空气弹簧静刚度分析 [J]. *机械工程与自动化*, 2023(6): 66–68, 71.
Dong J Z, Qin X M, Zhou P, et al. Static stiffness analysis of air spring based on ABAQUS software[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2023(6): 66–68, 71.
- [8] 邬明宇, 李雪冰, 尹航, 等. 双腔室空气弹簧动刚度理论模型与实验研究 [J]. *振动工程学报*, 2022, 35(4): 834–840.
Wu M Y, Li X B, Yin H, et al. Theoretical model and experimental research on dynamic stiffness of dual-chamber air spring[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(4): 834–840.
- [9] 王姣扬, 吴震宇, 张桂生, 等. 基于有限元的变刚度螺旋弹簧力学性能分析 [J]. *制造技术与机床*, 2025(1): 105–110.
Wang J Y, Wu Z Y, Zhang G S, et al. Mechanical properties analysis of variable stiffness helical spring based on finite element method[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2025(1): 105–110.
- [10] Jiang W G, Henshall J L. A novel finite element model for helical springs[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2000, 35(4): 363–377.
- [11] Renno J M, Mace B R. Vibration modelling of helical springs with non-uniform ends[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(12): 2809–2823.
- [12] 徐文灿, 胡俊. 计算流体力学(上)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011: 58–60.
Xu W C, Hu J. Computational fluid dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011: 58–60.
- [13] 李健, 李美, 谭偲龙, 等. 空气弹簧各向动刚度特性的有限元研究 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(3): 105–111.
Li J, Li M, Tan S L, et al. Finite element study on the dynamic stiffness characteristics of air springs[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2022, 36(3): 105–111.
- [14] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [15] 张远鹏, 丁建国, 陈鹏, 等. 囊式空气弹簧流固耦合建模及刚度特性分析 [J]. *科技通报*, 2025, 41(4): 51–57.
Zhang Y P, Ding J G, Chen P, et al. Modeling and stiffness characteristics analysis of fluid structure coupling of CAS[J].

Bulletin of Science and Technology, 2025, 41(4): 51–57.

[16] 任欢欢, 丁建国, 拜立岗. 微振动作用下半导体车间结构参数化分析 [J]. 江苏建筑, 2024(6): 24–28.

Ren H H, Ding J G, Bai L G. Micro-vibration response analysis of semiconductor workshop with different structural parameters[J]. *Jiangsu Construction*, 2024(6): 24–28.

作者贡献声明

陈明辉负责试验、仿真、数据采集、数据整理和初稿撰写。丁建国负责提出研究问题, 设计实验方案, 确定理论框架, 论文修改、逻辑调整和润色语言。拜立岗负责提供实验设备、数据资源和经费支持。江民负责提供实验设备、数据资源、经费支持和学术指导。

利益冲突声明

作者声明, 不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

AI 使用声明, 本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

伦理声明, 本文不涉及人类或动物的生物学研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 <https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025092401>。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件中。如需获取与本文相关的其他数据, 可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到国家自然科学基金项目(52305112)的支持。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52305112).

作者简介

陈明辉(2001—), 男, 江西九江人, 南京理工大学 2023 级土木工程专业硕士研究生。E-mail: 3267282217@qq.com。

丁建国(1962—), 男, 教授, 研究方向: 工程结构抗震与防灾、复杂系统动力学。E-mail: nustdjg@163.com。

拜立岗(1989—), 男, 甘肃庆阳人, 高级工程师, 研究方向: 复杂系统动力学。E-mail: bailigang2008@126.com。

江民(1991—)男, 安徽安庆人, 副教授, 研究方向: 复杂系统动力学。E-mail: jm_anhui@163.com。

(责任编辑: 张秀梅, 英文校对: 张国策)



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.

陈明辉等. 新型组合弹簧隔振器的静动态性能仿真与试验

Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

<https://hndk.hainanu.edu.cn>