

准零刚度低频隔振技术的研究进展*

RESEARCH PROGRESS ON QUASI-ZERO STIFFNESS LOW-FREQUENCY VIBRATION ISOLATION TECHNOLOGY

刘 琪**¹ 李占龙***^{1,2} 王建梅^{1,2} 连晋毅¹ 王 瑶¹

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 太原 030024)

(2. 教育部重型机械工程机械研究中心, 太原 030024)

LIU Qi¹ LI ZhanLong^{1,2} WANG JianMei^{1,2} LIAN JinYi¹ WANG Yao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Engineering Research Center Heavy Machinery Ministry of Education, Taiyuan 030024, China)

摘要 在低频隔振研究领域,准零刚度的提出给人们提供了新的解决思路。系统总结了各式准零刚度隔振器的结构和特点;具体描述准零刚度隔振器的控制方法和工程应用实例;对比分析准零刚度隔振器国内外研究发展现状;总结和展望了准零刚度隔振器未来的发展趋势。最后阐述了准零刚度隔振器现存的问题及相应的解决方案。

关键词 低频隔振 准零刚度 控制方法 工程应用 研究进展

中图分类号 TH113.1

Abstract In the field of low-frequency vibration isolation research, the proposed quasi-zero stiffness provides people with new solutions. This paper systematically summarizes the structure and characteristics of various quasi-zero stiffness isolators. The control method and engineering application examples of quasi-zero stiffness isolator are described in detail. The research status of quasi-zero stiffness isolator at home and abroad is compared and analyzed. And look forward to the future development trend of quasi-zero stiffness isolators. Finally, the existing problems and corresponding solutions of the quasi-zero stiffness isolator are described.

Key words Low-frequency vibration isolation; Quasi-zero stiffness; Control method; Engineering application; Research progress

Corresponding author: LI ZhanLong, E-mail: lizl@tyust.edu.cn

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51805347), and the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M661058), and the Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi (No. 2019L0635).

Manuscript received 20190918, in revised form 20191104.

引言

根据激励源的不同,隔振系统可分为主动隔振、半主动隔振、被动隔振。虽然采用主动隔振和半主动隔振可以有效隔离低频振动,但是这两者都需要外界提供能量,会带来结构、成本、污染等许多方面的问题。因此,被动隔振仍具有广泛的应用前景^[1]。

被动隔振系统根据特性的不同可以分为线性隔振和非线性隔振。对于线性隔振而言,只有当载荷频率大于其固有频率的 $\sqrt{2}$ 倍时,隔振系统才能发挥作用。

如果要降低起始隔振频率,提高隔振频段,必须减小固有频率,这就会导致隔振系统刚度减小,进而影响其承载能力。由此不难发现,对于线性隔振而言,固有频率和承载能力难以两全,两者始终是一对矛盾体。

因此,很有必要设计一种非线性被动隔振系统,使其具有静态高刚度、动态低刚度的非线性刚度特性,可同时满足静态支撑和动态低频隔振的需求。其中,准零刚度隔振器为一典型的非线性低频隔振系统^[2-3]。

* 20190918 收到初稿, 20191104 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (51805347), 中国博士后科学基金项目 (2019M661058), 山西省高等学校科技创新项目 (2019L0635) 资助。

** 刘 琪, 1995 年生, 男, 太原科技大学机械工程学院硕士研究生, 主要从事车辆动力学与控制研究。

*** 李占龙, 1985 年生, 男, 太原科技大学机械工程学院副教授, 主要从事工程机械低频阻尼隔振技术研究。

1 准零刚度隔振器的概念和特点

低频隔振和高承载能力的矛盾问题需从刚度入手,即设计一种非线性刚度隔振系统。准零刚度隔振器实质上是由正刚度元件与负刚度元件按一定规则组合而成,利用正负刚度的耦合效应实现“高静低动”非线性刚度特性,满足静态高承载力和动态低频隔振需求。

如图 1 所示,在承载 mg 的隔振物体时,线性弹簧和准零刚度隔振器在 x_e 处均达到静力平衡。在平衡位置 x_e 附近的微小范围 Δx 内振动力 F 和位移 x 的比值为动刚度,其余范围比值视为静刚度。由图 1 中的线性弹簧和准零刚度隔振器两条刚度曲线可知,线性弹簧的静态刚度和动态刚度相等且始终为一定值;准零刚度隔振器由于负刚度元件的作用,其动刚度在 Δx 范围趋近于零,在 Δx 以外的静刚度范围刚度则变大,从而实现了“高静低动”非线性变刚度。由此解决了低频隔振问题的矛盾点,在保证良好承载力的同时,扩展了隔振频率。

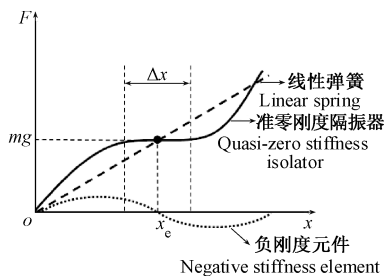


图 1 准零刚度隔振器的力-位移曲线

Fig.1 F - x curve of quasi-zero stiffness isolator

2 国内外研究进展

作为一种被动的非线性隔振系统,准零刚度隔振器不仅不需要外界提供能量,还可以通过适当地调节系统参数来同时获取较高的静态刚度和较低的动态刚度,从而在保证其承载能力的基础上具有良好的低频隔振性能,使其在近几年来成为国内外学者的研究热点。

2.1 准零刚度概念的提出

负刚度的概念作为研究雏形比准零刚度提出的更早。我国学者彭献等^[4]首先对负刚度以及准零刚度等特性开展研究,系统总结了准零刚度隔振器的定义、分类,并展开具体设计,对于准零刚度理论在国内的研究发展有重要影响。彭解华等^[5]对正负刚度并联机构的稳定性及应用开展研究。美国学者 Alabuzhev P 等^[6]在原本线性弹簧结构的基础上引入负刚度,提出了准零刚度的概念,初次对准零刚度理论进行了定义

和阐述,开始提出不同结构形式的隔振器。此后这类隔振器愈发受到国内外研究人员的关注。

2.2 准零刚度结构的演变

准零刚度隔振器总体上可以划分为三类:弹簧类、几何非线性类和磁性结构类。

2.2.1 弹簧类正负刚度并联类

这类隔振系统主要利用弹簧或其他类似变形机构的预压效应产生正负刚度,如斜置弹簧、蝶形弹簧、空气弹簧、膜片弹簧、欧拉压杆、屈曲梁等装置。

国内学者彭献等^[7]最早提出了连杆-弹簧的负刚度结构,形成了准零刚度隔振器的雏形,之后不断完善隔振结构,对系统的次谐波共振和超谐波共振响应进行研究。

Platus D L^[8-9]提出了正负刚度抵消的观点。采用轴向弹簧与相互铰接的两根杆互相并联的减振机构,如图 2 所示。

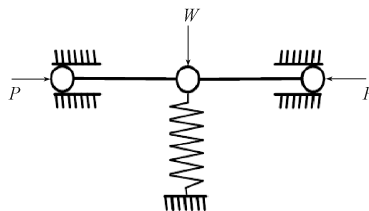


图 2 欧拉压杆示意图

Fig.2 Euler pressure bar diagram

南安普顿大学的 Carrella A 等^[10]提出的三弹簧结构是最为经典的模型,如图 3 所示。采用两个斜弹簧产生负刚度,抵消了其并联的竖直弹簧所产生的正刚度,由此设计了一个三弹簧组成的新型非线性隔振系统,探究了其传递规律和隔振性能,得到了高静刚度和低动刚度的准零刚度隔振特性。该学者继续对三弹簧结构^[11-12]做了优化计算,发现当构造参数满足一定关系时,系统在平衡位置处的动态刚度为零,且斜弹簧的角度在 $48^\circ \sim 57^\circ$ 范围内时,隔振器的力-位移曲线变化率最小。

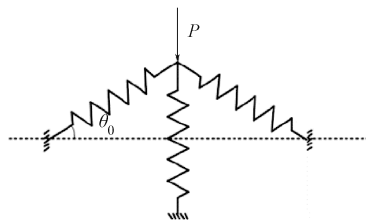


图 3 三弹簧结构示意图

Fig.3 Three spring structure diagram

在简单三弹簧结构的基础上, Kovacic I 等^[13-14]对该结构进行了优化设计研究,提出了用非线性的斜弹簧取代线性的斜弹簧,发现适当改变两个斜弹簧的预

压缩量可以使非线性斜弹簧系统隔振频率向更低频区域扩展,相比于线性弹簧更好达到扩展隔振频率的目的。

张月英等^[15]进一步增加了斜弹簧的数量,采用 4~8 个斜弹簧提供负刚度,并验证了其动力学隔振性能,都具有不错的低频隔振效果。徐道临等^[16-17]在原本三弹簧结构的基础上加入空气弹簧,设计了一款全新的非线性隔振器,通过实验分析得出其具有优于线性系统的低频隔振性能。

除了弹簧结构外,与此同时还有很多学者提出了相关结构。路纯红等^[18]提出了一种新型低频隔振器,如图 4 所示。该负刚度机构由左右对称的杠杆和连杆铰接而成,且通过具有预压缩量的水平弹簧提供预压力来实现机构在竖直方向上的负刚度。研究发现相对于结构参数相同的连杆-弹簧系统,该机构通过杠杆增大了系统的静态承载能力,但其具有准零刚度特性的位移范围稍有减小。

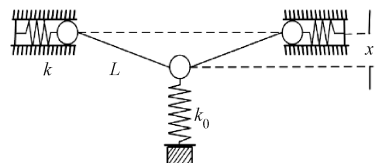


图 4 正负刚度并联原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of positive and negative stiffness parallel principle

刘兴天等^[19-20]提出了欧拉屈曲梁结构作为负刚度来调整平衡位置时的动刚度,将其与正刚度为螺旋弹簧的结构并联设计了准零刚度隔振器,从理论上分别研究了激励幅值、阻尼比和非线性项对系统频响特性曲线和隔振性能的影响。XU D L 等^[21-22]设计出利用屈曲板提供负刚度的准零刚度隔振器、滚轮型准零刚度隔振器,并通过静力学实验和动力学实验得到了力-位移曲线和力传递率曲线;进一步利用气缸原理设计成可调式准零刚度隔振器。该设计的优点在于可以实现系统的承载可调,具有良好的适应性,在不同载荷情况下,都可以使系统处于准零刚度状态,始终具有良好的低频隔振效果。

孟令帅等^[23-24]研究了具有等厚度蝶形弹簧的准零刚度隔振器,利用平均法推导了谐波力和位移激励下系统的传递率,并探究了激励振幅、质量比和阻尼比等对系统传递率的影响。俄罗斯学者 Valeev Anvar, Kharisov S 等^[25-26]将碟簧应用到准零刚度隔振机构中,通过分析确定了所述隔振机构的设计参数,提出了单独碟簧和环形结构组合而成的碟簧模型。

2.2.2 几何非线性类

几何非线性是指通过结构的变位使体系呈非线性

力-位移关系,如结构的大变形、大挠度等问题。几何非线性准零刚度结构是利用结构非线性力学特性的不稳定态来实现负刚度,进而达到降低系统固有频率的目的。

Winterflood J 等^[27]提出了一种对称扭杆弹簧隔振系统模型,如图 5 所示,其基本原理是利用两个对称的扭杆弹簧系统所产生的几何非线性效应使共振周期延长,从而达到低频隔振的效果。在实际操作中发现扭杆臂本身的质量对振动性能有显著影响。

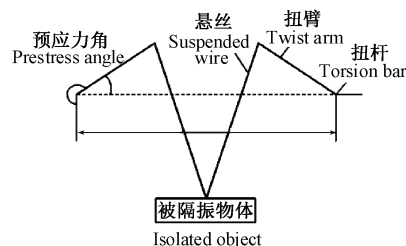


图 5 扭杆弹簧示意图

Fig.5 Torsion bar spring

王毅等^[28]提出一种带滚球装置的准零刚度隔振器。对隔振器进行了静力学分析,建立了隔振系统动力学模型,讨论了激励幅值和阻尼对响应的影响。在提供优异的低频隔振性能的同时,这种紧凑型的设计有利于工程实现。王心龙等^[29]提出一种含凸轮滚轮组合机构的准零刚度隔振器。建立了隔振系统的运动方程,对准零刚度隔振系统进行了激振实验分析,测定了不同工况下的力传递率,并与相应的线性系统进行对比,隔振效果显著。

2.2.3 磁性结构类

当永磁铁、电磁铁作为负刚度元件时,磁力将抵消部分正刚度系统的弹性恢复力从而实现准零刚度。

Carrella A 等^[30]提出了一种利用永磁铁的准零刚度方案,由中心质量磁铁与两端的磁铁之间的相互吸引提供负刚度,螺旋弹簧提供正刚度,动力学特性分析表明该结构隔振效果要优于普通线性系统隔振。Zhou N 等^[31]利用电磁铁设计了刚度可调的具有高静刚度-低动刚度的磁性隔振器。该模型是由一个机械弹簧与磁弹簧并联,磁弹簧由电磁铁和永磁铁构成,电磁铁电流的大小控制刚度数值,正负刚度也可以通过电流极性调节。

Robertson W S F 等^[32]采用不同质量的被隔振物体来确定两端立方体永磁铁布置方位和截面积,提出了一种仅用永磁铁的准零刚度隔振器。郑宜生等^[33]设计了一种采用环形永磁铁产生负刚度的准零刚度隔振器。柴凯,杨庆超等^[34]分别利用等效磁荷法建立矩形永磁铁和双环形永磁铁的磁力和刚度解析模型,计算并验证了最优充磁方式和磁铁布置形式。

Shi Xiang 和 Zhu Songye^[35]提出了两种新型 MNSD 磁性隔振结构。利用 Coulombian 模型对 MNSD 中的负刚度和涡流阻尼进行了数值模拟。通过实验验证了数值模型的准确性并进行了一系列参数研究。结果表明,增加磁体尺寸并不一定会增加 MNSD 刚度。基于优化结果,建立了不同尺寸之间的最佳关系,从而在 MNSD 中实现最大准零刚度范围。Dong G 和 Zhang X 等^[36-37]开发了一种由螺旋结合构成的具有高静态低动态刚度(HSLDS)的隔振器。其采用挠性弹簧与磁性负刚度弹簧并联的机构,并由此设计了一种基于 HSLDS 支柱和空间摆组合的新型多向隔振器,可用于多维低频振动隔离。

李强等^[38-39]针对超精密领域小负载隔振的需求,提出一种永磁弹簧和橡胶带正负刚度并联的隔振新构型。基于橡胶带拉力和刚度的数学模型,建立了正负刚度并联永磁隔振器的动力学方程,分析了该隔振器的隔振性能,并搭建了实验台,如图 6。结果表明,该隔振器隔振性能的理论计算和实验结果比较吻合,且具有良好的隔振性。

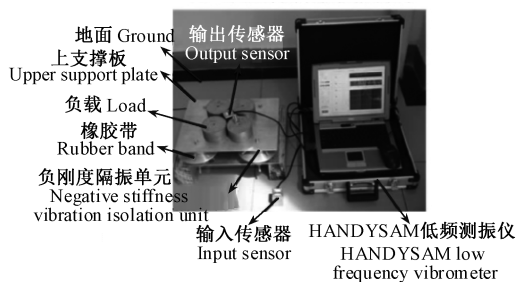


图 6 隔振器隔振性能测试实验台

Fig.6 Vibration isolator performance test bench

严博等^[40]考虑到加速度激励下带来的振动破坏,提出利用多个永磁体的不同磁化方式和布置形式来实现高性能的非线性隔振,如图 7。试验中分别研究了隔振器在 0.2g、0.3g、5g 及 7g 加速度激励下的隔振性能,验证了在小幅值和大幅值激励下的有效隔振。

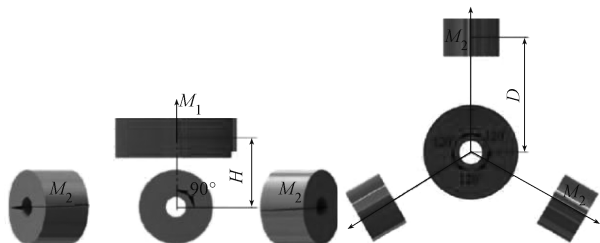


图 7 永磁体分布

Fig.7 Permanent magnet distribution

王云峰等^[41]设计的两端固支屈曲梁准零刚度隔振器具有高静刚度低动刚度特性,且避免了铰接引入的间隙和摩擦,可适用于微振动隔振。

2.2.4 创新型结构

目前准零刚度领域已获得诸多成果,如橡胶隔振器、磁性隔振器和空气弹簧隔振器等。但由于低频重载的严苛要求以及周围环境的多样性与复杂性,现有隔振方法仍存在着诸如承载能力低、低频与宽频隔振效果差、使用寿命短、维护复杂、气密性不足等问题。故研究人员已经不再拘泥于固有的原理和结构,对全新的隔振机理展开了深入探讨。

从混合介质到固液混合介质,从弹性发泡材料到不同成分缓冲液的对比较研究,试验后发现混合介质具有良好的隔振性能。高雪^[42]设计了改进后的波纹管式液固混合介质隔振器,如图 8 所示。合金制成的波纹管配合介质液体在低频重载隔振下保持良好的耐久性。

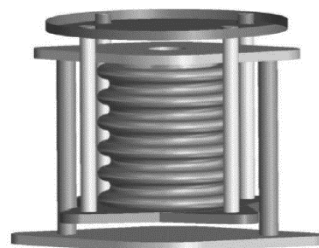


图 8 波纹管混合介质隔振器

Fig.8 Bellows mixed medium isolator

通过水和多孔疏水材料组成的分子弹簧介质,密封在活塞液压缸后,组成的分子弹簧隔振器(如图 9 所示)^[43]。该隔振器将水和多孔疏水材料颗粒组成的分子弹簧介质密封在活塞液压缸内,当缸体压强达到某一临界值时,大量水分子涌入疏水材料颗粒的纳米微孔,将振动能量转化为液固界面能和摩擦能,进而实现振动能量耗散。研究表明,此类结构表现出类似于负刚度结构的临界失稳状态,并具有非线性刚度特性,但相关隔振结构及其振动耗散机理研究鲜有报道。

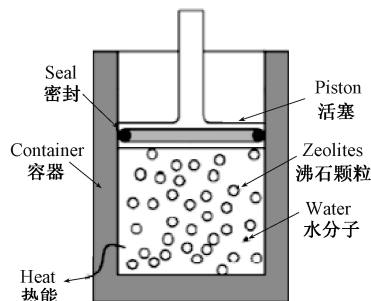


图 9 分子弹簧隔振器

Fig.9 Molecular spring isolator

Yang P 和 Van Dyke S 等^[44]研究了碳纤维环氧编织锥形碟形弹簧的力学行为,提出了一种用于预测具有任意几何参数的特殊正交异性层压板的碟簧变形分

析方法。此类新型复合结构表现出典型的非线性力学行为特性,在新型负刚度结构领域有潜在的应用价值。

郭怀攀等^[45]建立了正交铺设复合材料层合板的理论模型,发现随着层合板厚度增加,其负刚度变形区间逐渐变窄,当层合板厚度达到失去双稳定特性临界厚度时,层合板具有准零刚度特性。

2.3 准零刚度隔振器的研究近态

近年以来,准零刚度隔振器的研究方兴未艾,总体上越来越注重于实际需求和应用。主要集中在两个方向:一是对于自适应型隔振器结构或主动控制方面的拓展研究;二是在原本各种准零隔振器结构的基础上,进行多方向多自由度隔振平台的设计。

任旭东^[46]通过一个竖直空气弹簧并联两个水平对称空气弹簧构成准零刚度。该结构具有只要改变连杆长度就可调节刚度、实现隔振器主动控制的特点,之后应用于野战急救车担架支架隔振,展现出良好的工程应用性。孙秀婷和富展展^[47]提出一种多自由度非线性隔振平台,利用一组预压的三角机构和曲面边界实现了竖直-旋转多自由度的负刚度特性,再结合正刚度元件,实现竖直-旋转多自由度准零刚度特性。蓝双和杨晓翔^[48]摒弃了传统的提供负刚度的机构压缩弹簧,转而在实验中开始尝试采用拉伸弹簧的准零刚度隔振器,如图 10。通过模拟基座激励得到位移传递率,证实了在低频和超低频隔阵中拉伸式准零刚度隔振器性能远胜于线性隔振器;又进行了压缩式和拉伸式的动力学分析比对,得出拉伸式具有更宽的准零刚度区间以及结构上的优势。

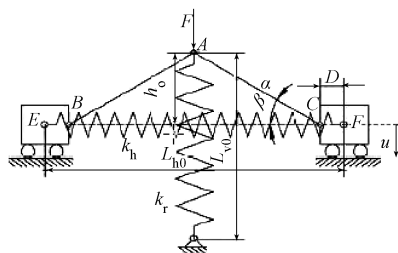


图 10 拉伸式准零刚度结构

Fig.10 Tensile quasi-zero stiffness structure

杜宁等^[49]考虑到车载式光电设备在运输过程中易受干扰源的影响,原本对侧壁安装减震装置的方法已暴露出许多弊端,不能满足光电设备稳定性的要求。通过利用平行四边形的不稳定性来产生负动刚度,并与产生正刚度的弹簧并联,可同时实现水平两个方向上的低频隔振,如图 11。另外将安装位置转移到车底,对于整车的合理配置和空间利用十分有益。

Sadegh Sahand 和 Li Suyi^[50]通过计算和实验验证了流体折纸细胞结构的非对称准零刚度特性,可调节流体折纸的内压力以适应外载变化,并研究其在低频

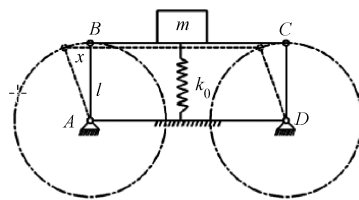


图 11 平行四边形负刚度的隔振系统

Fig.11 Vibration isolation system with parallelogram negative stiffness

隔振中的应用。该方法主体采用堆叠的 Miura-Ori 板组成的流体折纸(如图 12 所示),得到了不同的流体折纸蜂窝结构设计下的准零刚度特性。

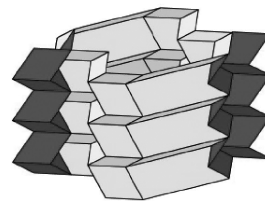


图 12 流体折纸原型

Fig.12 Fluid origami prototype

Liu Y 等^[51]设计了凸轮-滚子-非线性弹簧机构,如图 13。其中两个水平阻尼器对称安装用作负刚度提供器,与垂直弹簧并联连接,并讨论了水平阻尼对系统隔离力激励和位移激励的能力的影响。

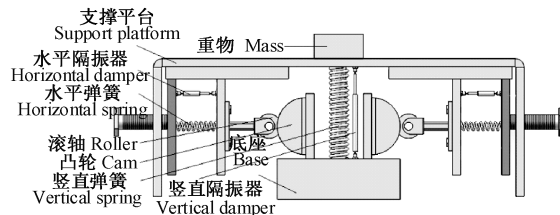


图 13 凸轮-滚子结构

Fig.13 Cam-roller-nonlinear mechanisms

3 准零刚度隔振器的主动控制

准零刚度隔振器作为被动隔振器自身就可以实现隔振,相较于线性隔振器虽具有隔振频率范围广,静态刚度高的优点,但其共振峰值过大的问题不容忽视。此外,由于准零刚度隔振器固有的非线性,会造成系统的跳跃现象,这给后续的工程应用增加了难度。为了获得更好的隔振效果,相关研究尝试在准零刚度隔振系统介入主动控制单元。

王勇等^[52]将立方速度反馈控制策略引入含斜置弹簧的正负刚度并联组成准零刚度隔振器的主动控制中。采用了立方速度反馈控制的准零刚度隔振器在主共振峰处的幅值及亚谐共振存在的区域会逐渐减小,力传递率共振峰处的幅值降低且高频传递特性得到有效改善,提高了隔振性能。

程春等^[53]提出了时滞立方位移反馈控制,通过选择恰当的反馈增益和滞后时间能够有效降低准零刚度隔振器共振区相对位移的幅值和绝对位移传递率,减小系统的共振频率。如图 14 所示。李东海,赵寿根等^[54-55]也证实了时滞控制系统有效性,且可使隔振器适应更加极端的工作环境。

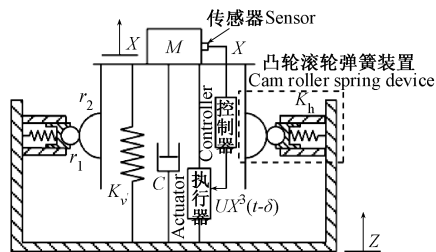


图 14 时滞立方位移反馈控制的准零刚度隔振器

Fig.14 Quasi-zero stiffness isolator with time-delay cubic displacement feedback control

范达和贾海鹏^[56]针对静电悬浮的双级无拖曳天基超静平台,提出一种全频段的绝对零刚度构造方法,并给出基于反馈电压调制的零刚度隔振与主动减振控制的兼容设计方法。杨攀、邓兆祥等^[57]发现非线性阻尼控制器可精确测量绝对振动位移。此法使准零刚度传感系统中测量频带与中高频精度之间的问题得到解决,如图 15。左兆伦等^[58]将开环加闭环的 OPCL 控制方法应用于两自由度准零刚度隔振系统的吸引子迁移控制和广义混沌同步化。

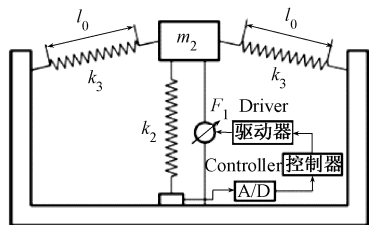


图 15 非线性阻尼控制器的安装位置

Fig.15 Mounting position of the nonlinear damping controller

赵建学等^[59]发现准零刚度隔振系统存在吸引子共存现象,应用开环加闭环控制方法仿真实现了吸引子的迁移控制,使系统由振幅大吸引子迁移至振幅小的吸引子上,实现低频减振。

4 工程应用

准零刚度隔振器作为新型隔振器逐步广泛应用于精密工程、车辆运输、轨道交通、航空航天和机器人等领域。

早在 1979 年 Vaneijk J 等^[60]就将准零刚度原理应用于钢板弹簧机构的优化设计中,这是尝试应用准零刚度的开始。

近年来,准零刚度隔振器在汽车座椅隔振和有轨电车悬挂系统上的低频隔振应用较为广泛。韩国蔚山大学的 Thanh D L 等^[61-62]开始把准零刚度隔振器运用到汽车座椅隔振上,实验结果显示,在同样的激振力条件下,带准零刚度座椅与传统隔振器座椅相比,位移的均方根值减小 67.2%,隔振效果优异,大幅提升了乘员的舒适性品质。王勇、李舜酪等^[63]建立了准零刚度隔振器的 8 自由度车-座椅-人耦合动力学模型。陈志辉、翟婉明等^[64]在车辆二系悬挂上开展了准零刚度隔振器的应用研究,结果表明,车辆垂向动态响应在低频范围内的隔振效果良好,如图 16 所示。

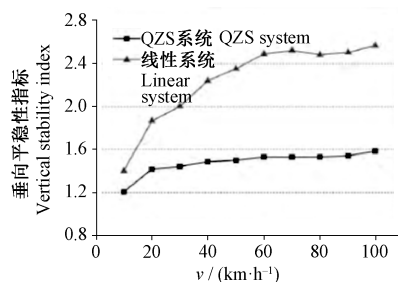


图 16 车体垂向平稳性指标

Fig.16 Vehicle body vertical stability index

Jangheon Kim 等^[65]提出了一种准零刚度的新型振动传感器,适用于超精密传感测量极弱电磁场的系统。由于非线性刚度和磁滞会降低系统性能,因此这种改进后的准零刚度隔振器具有刚度和阻尼不变的特性。

航天力学环境对航天器搭载的精密仪器提出了更高的要求,如卫星在轨工作期间,星上执行元件、大型挠性附件的振颤都会产生扰动而引起航天器产生从超低频到高频的振动响应。传统隔振器普遍对 10 Hz 以下的低频以及超低频的振动隔振能力较差。闫健^[66]将准零刚度隔振器应用在卫星上(如图 17 所示),通过检测卫星上不同位置的振动响应来探究准零刚度隔振器对卫星挠性附件的抑制效果。

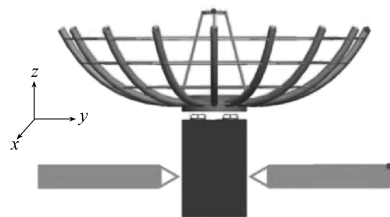


图 17 整星多体动力学仿真模型

Fig.17 Whole star multi-body dynamics simulation model

杨雪锋等^[67]为解决低频振动对康复机器人的影响问题,在下肢康复机器人足部安装了由负刚度拉伸弹簧并联线性正刚度弹簧的准零刚度隔振器,如图 18。该研究实现了对机器人足部低频振动的有效衰

减,降低了康复机器人对于残疾病患的不良影响。

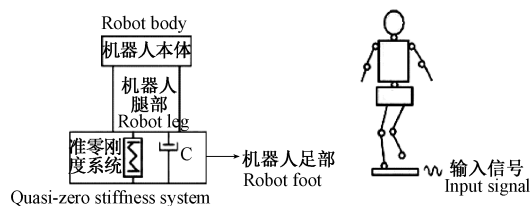


图 18 康复机器人足部隔振

Fig.18 Rehabilitation robot foot vibration isolation

5 研究展望

综上所述,高静态低动态刚度的隔振系统能够克服线性系统的低频隔振缺陷,是现在以及未来振动控制领域的重要课题之一。但在以后的研究中依旧存在许多亟待解决的问题。

1) 以实际工程应用为目标,着手于新设计新方案,重点解决负刚度结构的实现方式及其参数优化问题。随着大量新颖的负刚度结构出现,准零位置出现的跳跃不稳定性问题更需有效控制,提升结构的时效性和鲁棒性。

2) 实现准零隔振与能量采集一体化,向多功能集成化、轻量化、微小化方向发展。同时对于整体结构产生的负面影响也应有充分预估,如:对于磁性负刚度结构由磁衰减效应引发的承载能力不足及对精密隔振对象产生的电磁干扰问题应广泛深入探索。

3) 新材料的出现为准零隔振结构的创新设计提供了丰富的原动力,如形状记忆合金、磁流变液和压电晶体等。此类创新结构可满足精密及微纳结构的高精度隔振需求,具有广阔的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 贾九红,胡潇寅,赵 鹏,等.中国机械强度与振动研究的现状-基于文献计量学的分析[J].机械强度,2012,34(5):761-766.
JIA JiuHong, HU XiaoYin, ZHAO Peng, et al. Mechanical strength and vibration in china: state of the art[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(5):761-766 (In Chinese).
- [2] Hayashi C, Shepard S, Winkler I, et al. Nonlinear oscillations in physical systems[M]. New York: McGraw-Hill, 1964: 3-4.
- [3] Rahman Z, Burton T D. Application of catastrophe theory to forced vibration of a diaphragm spring [J]. Journal of Sound and Vibration, 1986(11):363-380.
- [4] 彭 献,陈树年,宋福馨.负刚度的工作原理及应用初探[J].湖南大学学报,1992(4):89-94.
PENG Xian, CHEN ShuNian, SONG FuXin. Research on theory of negative stiffness and its application [J]. Journal of Hunan University, 1992(4):89-94 (In Chinese).
- [5] 彭解华,陈树年.正、负刚度并联机构的稳定性及应用研究[J].振动、测试与诊断,1995,15(2):14-18.
PENG JieHua, CHEN ShuNian. The stability and application of a

structure with positive stiffness element and negative stiffness element [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1995, 15(2):14-18 (In Chinese).

- [6] Alabuzhev P, Gritchin, Kin L, et al. Vibration protecting and measuring systems with quasi-zero-stiffness [M]. Hemisphere Publishing Corporation, 1989:7-21.
- [7] 彭 献,黎大志.准零刚度隔振器及弹性特性设计[J].振动、测试与诊断,1997,17(4):44-46.
PENG Xian, LI DaZhi. Quasi-Zero stiffness vibration isolation and design for their elastic characteristics [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1997,17(4):44-46 (In Chinese).
- [8] Platus D L. Negative-stiffness-mechanism vibration isolation systems [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology, San Jose, CA, USA, 1991(1619):44-54.
- [9] Platus D L. Negative-stiffness-mechanism vibration isolation systems [J]. Proceedings of SPIE, 1999(3786):98-105.
- [10] Carrella A, Brennan M J, Waters T P. Static analysis of a passive vibration isolator with quasi-zero-stiffness characteristic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007(301):678-689.
- [11] Carrella A, Brennan M J, Kovacic I, et al. On the force transmissibility of a vibration isolator with quasi-zero-stiffness [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 332(45):707-717.
- [12] Carrella A, Friswell M I, Zotov, et al. Using nonlinear springs to reduce the whirling of a rotating shaft [J]. Mechanical System and Signal Processing, 2009(23):2228-2235.
- [13] Kovacic I, Brennan M J, Waters T, et al. A study of a nonlinear vibration isolator with a quasi-zero-stiffness characteristic [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 315(3):700-711.
- [14] Kovacic I, Brennan M J, Lineton B, et al. Effect of a static force on dynamic behavior of a harmonically excited quasi-zero-stiffness system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 325(4/5):870-883.
- [15] 张月英.准零刚度隔振器的特性分析及实验研究[D].长沙:湖南大学,2013:7-17.
ZHANG YueYing. On analytical and experimental assessment of quasi-zero-stiffness isolator[D]. Changsha: Hunan University, 2013:7-17 (In Chinese).
- [16] 徐道临,张月英,周加喜,等.一种准零刚度隔振器的特性分析与实验研究[J].振动与冲击,2014,33(11):208-213.
XU DaoLin, ZHANG YueYing, ZHOU JiaXi, et al. Characteristic analysis and experimental investigation for a vibration isolator with quasi-zero stiffness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11):208-213 (In Chinese).
- [17] 徐道临,赵 智,周加喜,等.气动可调式准零刚度隔振器设计及特性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(6):47-52.
XU DaoLin, ZHAO Zhi, ZHOU JiaXi, et al. Design and analysis of an adjustable pneumatic vibration isolator with quasi-zero-stiffness characteristic [J]. Journal of Hunan University (Nature Science Edition), 2013, 40(6):47-52 (In Chinese).
- [18] 路纯红,白鸿柏.新型超低频非线性被动隔振系统的设计[J].振动与冲击,2011,30(1):234-236.
LU ChunHong, BAI HongBai. A new type nonlinear ultra-low frequency passive vibration isolation system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1):234-236 (In Chinese).

- [19] 刘兴天, 张志谊, 华宏星. 新型低频隔振器的特性研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5):161-164.
LIU XingTian, ZHANG ZhiYi, HUA HongXing. Characteristics of a novel low-frequency isolator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(5):161-164(In Chinese).
- [20] Liu X, Huang X, Hua H, et al. On the characteristics of a quasi-zero stiffness isolator using euler buckled beams as negative stiffness corrector[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013(332):3359-3376.
- [21] Xu D L, Yu Q P, Zhou J X, et al. Theoretical and experimental analyses of a nonlinear magnetic vibration isolator with quasi-zero-stiffness characteristic [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013(332):3377-3389.
- [22] Xu D L, Zhang Y Y, Zhou J X, et al. On the analytical and experimental assessment of performance of a quasi-zero-stiffness isolator[J]. Journal of Vibration and Control, 2014:2314-2325.
- [23] 孟令帅, 孙景工, 牛 福, 等. 新型准零刚度隔振系统的设计与研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11):195-199.
MENG LingShuai, SUN JingGong, NIU Fu, et al. Design and analysis of a novel quasi-zero stiffness vibration isolation system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11):195-199(In Chinese).
- [24] Lingshuai Meng, Jinggong Sun, Wenjuan Wu. Theoretical design and characteristics analysis of a quasi-zero stiffness isolator using a disk spring as negative stiffness element[J]. Shock and Vibration, 2015:1-19.
- [25] Valeev Anvar, Zotov Alexey, Kharisov S. Designing of compact low frequency vibration isolator with quasi-zero-stiffness[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2015, 34(4):459-473.
- [26] Valeev Anvar, Zotov Alexey, Tokarev Artem. Study of application of vibration isolators with quasi-zero stiffness for reducing dynamics loads on the foundation[J]. Procedia Engineering, 2017(176):137-143.
- [27] Winterflood J, Blair D G. A long-period vertical vibration isolator for gravitational wave detection[J]. Physics Letters A, 1998, 243(1):1-6.
- [28] 王 毅, 徐道临, 周加喜. 滚球型准零刚度隔振器的特性分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4):142-147.
WANG Yi, XU DaoLin, ZHOU JiaXi. Characteristic analysis of a ball-type vibration isolator with quasi-zero-stiffness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(4):142-147(In Chinese).
- [29] 周加喜, 王心龙, 徐道临, 等. 含凸轮-滚轮机构的准零刚度隔振系统隔振特性实验研究[J]. 振动工程学报, 2015, 28(3):449-455.
ZHOU JiaXi, WANG XinLong, XU DaoLin, et al. Experimental study on vibration isolation characteristics of the quasi-zero stiffness isolator with cam-roller mechanism [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(3):449-455(In Chinese).
- [30] Carrella A, Brennan M J, Waters T P, et al. Force and displacement transmissibility of a nonlinear isolator with high-static-low-dynamic-stiffness [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012(55):22-29.
- [31] Zhou N, Liu K. A tunable high-static-low-dynamic stiffness vibration isolator[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 329(9):1254-1273.
- [32] Robertson W S F, Kidner M R, Cazzolato B S. Theoretical design parameters for a quasi-zero stiffness magnetic spring for vibration isolation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009(326):88-103.
- [33] 郑宜生, 张希农, 李青频, 等. 一种采用环形永磁铁产生负刚度的准零刚度隔振器[P]. 中国. CN201410582655.4. 2014-10-27.
ZHENG YiSheng, ZHANG XiNong, LI Qing Pin, et al. Quasi-zero stiffness isolator with negative stiffness generated by annular permanent magnet[P]. China. CN201410582655.4. 2014-10-27.
- [34] 柴 凯, 杨庆超, 朱石坚, 等. 双环永磁铁型准零刚度隔振器的设计和分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2017:1-6.
CHAI Kai, YANG QingChao, ZHU ShiJian, et al. Design and analysis of quasi-zero stiffness vibration isolator with bi-annular-shaped permanent magnet[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017:1-6(In Chinese).
- [35] Xiang Shi, Songye Zhu. Simulation and optimization of magnetic negative stiffness dampers [J]. Sensors and Actuators A, 2017(259):14-33.
- [36] Dong G, Zhang X, Xie S, et al. Simulated and experimental studies on a high-static-low-dynamic stiffness isolator using magnetic negative stiffness spring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017(86):188-203.
- [37] Dong G, Zhang X, Luo Y, et al. Analytical study of the low frequency multi-direction isolator with high-static-low-dynamic stiffness struts and spatial pendulum[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018(110):521-539.
- [38] 李 强, 徐登峰, 范 新, 等. 新型永磁隔振器的隔振性能分析与实验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13):7-12.
LI Qiang, XU DengFeng, FAN Xin, et al. Analysis and test of vibration isolation performance for a novel permanent magnet vibration isolator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(13):7-12(In Chinese).
- [39] 李 强, 徐登峰, 李 林, 等. 基于正负刚度并联永磁隔振器的隔振性能分析及实验验证[J]. 振动与冲击, 2019, 38(16):100-114.
LI Qiang, XU DengFeng, FAN Xin, et al. Analysis and test of vibration isolation performance for a novel permanent magnet vibration isolator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(16):100-114(In Chinese).
- [40] 严 博, 马洪业, 韩瑞祥, 等. 可用于大幅值激励的永磁式非线性隔振器[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11):169-175.
YAN Bo, MA HongYe, HAN RuiXiang, et al. Permanent magnets based nonlinear vibration isolator subjected to large amplitude acceleration excitations [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11):169-175(In Chinese).
- [41] 王云峰, 李 博, 王利桐. 两端固支屈曲梁准零刚度隔振器的微振动隔振性能分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15):124-129.
WANG YunFeng, LI Bo, WANG LiTong. Micro-vibration isolation performance of a clamped-clamped buckled beam quasi-zero-stiffness isolator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15):124-129(In Chinese).
- [42] 高 雪. 一类液固混合介质隔振系统的非线性动力学行为与设计方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014:1-34.
GAO Xue. Nonlinear dynamical behaviours and design methodology

- for a class of solid and liquid mixture vibration isolator [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 1-34 (In Chinese).
- [43] 余慕春, 高 雪, 陈 前. 分子弹簧隔振器的动力学特性研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(5): 913-919.
YU MuChun, GAO Xun, CHEN Qian. Dynamic properties of molecular spring isolator [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(5): 913-919 (In Chinese).
- [44] Yang P, Van Dyke S, Elhajjar R F. An investigation into the mechanics of fiber reinforced composite disk springs [J]. Steel and Composite Structures, 2015, 18(3): 775-791.
- [45] 郭怀攀, 李 昊, 陈卫东, 等. 基于非对称复合材料层合板的准零刚度隔振系统[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 222-229.
GUO HuaiPan, LI Hao, CHEN WeiDong, et al. A quasi-zero-stiffness vibration isolation system based on unsymmetric composite laminate [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 222-229 (In Chinese).
- [46] 任旭东. 空气弹簧准零刚度隔振器的特性分析及应用研究[D]. 北京: 军事医学科学院, 2017: 11-29.
REN XuDong. Characteristics analysis and application study of the quasi-zero stiffness isolator using air spring [J]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, 2017: 11-29 (In Chinese).
- [47] 孙秀婷, 富展展. 一类新型多方向准零刚度隔振平台[J]. 力学季刊, 2018, 39(2): 249-257.
SUN XiuTing, FU ZhanZhan. A novel multi-direction quasi-zero-stiffness vibration isolation platform [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2018, 39(2): 249-257 (In Chinese).
- [48] 蓝 双, 杨晓翔. 新型准零刚度系统的设计、分析与仿真[J]. 机械强度, 2018, 40(3): 515-521.
LAN Shuang, YANG XiaoXiang. Design analysis and simulation of a novel quasi-zero stiffness vibration isolation system [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(3): 515-521 (In Chinese).
- [49] 杜 宁, 胡明勇, 毕 勇, 等. 一种车载设备的低频水平减振方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 184-190.
DU Ning, HU MingYong, BI Yong, et al. A low frequency horizontal vibration reduction method for a vehicle-borne photoelectric instrument [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 184-190 (In Chinese).
- [50] Sahand Sadeghi, Suyi Li. Fluidic origami cellular structure with asymmetric quasi-zero stiffness for low-frequency vibration isolation [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(6): 1-37.
- [51] Liu Y, Xu L, Song C, et al. Dynamic characteristics of a quasi-zero stiffness vibration isolator with nonlinear stiffness and damping [J]. Archive of Applied Mechanics, 2019, 89(9): 1743-1759.
- [52] 王 勇, 李舜酩, 程 春, 等. 立方速度反馈控制的准零刚度隔振器动力学特性分析[J]. 振动工程学报, 2016, 29(2): 305-313.
WANG Yong, LI ShunMing, CHENG Chun, et al. Dynamic analysis of a quasi-zero-stiffness vibration isolator with cubic velocity feedback control [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(2): 305-313 (In Chinese).
- [53] 程 春, 李舜酩, 王 勇, 等. 时滞立方位移反馈控制的高静低动刚度隔振器动力学分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 110-115.
CHENG Chun, LI ShunMing, WANG Yong, et al. Dynamic analysis of a high-static-low-dynamic stiffness vibration isolator with time-delay cubic displacement feedback control [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 110-115 (In Chinese).
- [54] 李东海, 赵寿根, 何玉金, 等. 含有时滞控制的准零刚度隔振器的隔振性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(6): 1168-1175.
LI DongHai, ZHAO ShouGen, HE YuJin, et al. Study on the performance of quasi-zero-stiffness isolator with time delay control [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(6): 1168-1175 (In Chinese).
- [55] 李东海, 赵寿根, 何玉金, 等. 含有时滞控制的准零刚度隔振器动力学分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 49-55.
LI DongHai, ZHAO ShouGen, HE YuJin, et al. Dynamical analysis of a QZS vibration isolator with time-delay control [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 49-55 (In Chinese).
- [56] 范 达, 贾海鹏. 基于静电悬浮的零刚度隔振减振控制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(4): 531-539.
FAN Da, JIA HaiPeng. Zero-stiffness vibration isolation and damping control method based on electrostatic suspension [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(4): 531-539 (In Chinese).
- [57] 杨 攀, 邓兆祥, 舒红宇, 等. 等效非线性阻尼控制的准零刚度振动传感系统[J]. 中国机械工程, 2018, 29(12): 1439-1445.
YANG Pan, DENG ZhaoXiang, SHU HongYu, et al. Quasi-zero-stiffness vibration sensor system of equivalent nonlinear damping control [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(12): 1439-1445 (In Chinese).
- [58] 左兆伦, 俞 翔, 柴 凯, 等. OPCL 控制方法在准零刚度隔振系统中的应用研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(1): 129-136.
ZUO ZhaoLun, YU Xiang, CHAI Kai, et al. Applications of OPCL control method in vibration isolation system with quasi-zero stiffness characteristics [J]. China Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(1): 129-136 (In Chinese).
- [59] 赵建学, 俞 翔, 柴 凯, 等. 准零刚度隔振系统吸引子迁移控制研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 220-224.
ZHAO JianXue, YU Xiang, CHAI Kai, et al. Attractor migration control of a vibration isolation system with quasi zero stiffness [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(22): 220-224 (In Chinese).
- [60] Vaneijk J, Dijkstra J F. Plate spring mechanism with constant negative stiffness [J]. Mechanism and Machine Theory, 1979, (0094-114X), 14(1): 1.
- [61] Thanh D L, Kyoung K A. A vibration isolation system in low frequency excitation region using negative stiffness structure for vehicle seat [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011(330): 6311-6355.
- [62] Thanh D L, Kyoung K A. Experimental investigation of a vibration isolation system using negative stiffness structure [J]. Mechanical Sciences, 2013(158): 1011-1029.
- [63] 王 勇, 李舜酩, 程 春. 基于准零刚度隔振器的车-座椅-人耦合模型动态特性研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(15): 190-196.
WANG Yong, LI ShunMing, CHENG Chun. Dynamic characteristics of a vehicle-seat-human coupled model with quasi-zero-stiffness isolators [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(15): 190-196 (In Chinese).

- [64] 陈志辉, 翟婉明, 朱胜阳, 等. 基于准零刚度理论的悬挂式单轨车辆二系悬挂系统研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2):13-22.
CHEN ZhiHui, ZHAI WanMing, ZHU ShengYang, et al. Performance study on the secondary suspension system of a suspended monorail vehicle based on the quasi-zero-stiffness theory [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(2):13-22 (In Chinese).
- [65] Jangheon Kim, Youngjun Jeon, Sangwoo Um, et al. A novel passive quasi-zero stiffness isolator for ultra-precision measurement systems [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(9): 1573-1580.
- [66] 闫 健. 准零刚度隔振器特性研究与星上隔振应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 28-37.
YAN Jian. Characterization analysis of quasi zero stiffness isolator and application on satellite vibration suppression [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 28-37(In Chinese).
- [67] 杨雪锋, 孟庆国, 李 威, 等. 康复机器人准零刚度隔振特性分析与实验[J]. 振动.测试与诊断, 2019, 39(2):298-305.
YANG XueFeng, MENG QingGuo, LI Wei, et al. Analysis and experimental study on quasi-zero-stiffness vibration isolation characteristics of rehabilitation robot [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2):298-305(In Chinese).