文章编号：1008－8857(2026)01－0033－11 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.01.005

准零刚度隔振系统结构综述

田海洋[1]，张万福[1]，张 扬[1]，李 春[1]，曹 浩[2]
（1. 上海理工大学 能源与动力工程学院/上海市动力工程多相流动与传热重点实验室，上海 200093；2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院，湖南 长沙 410007）

摘 要：航天器微振动、精密仪器低频振动以及船舶汽车宽频振动的隔离是传统线性隔振系统难以实现的。准零刚度隔振系统具有高静刚度、低动刚度的特性，可在不损失静刚度的情况下实现低频隔振，其在微振动、低频振动、宽频振动等领域一直是国内外学者研究的热点。介绍了准零刚度的概念及其负刚度结构，在此基础上，对各结构进行了评述，指出了各结构的优势与不足，总结了准零刚度隔振系统在汽车隔振、机械制造、航空航天等方面的应用，并对准零刚度结构的后续研究提出了展望。

关键词：准零刚度；负刚度；低频隔振；宽频隔振；振动控制
中图分类号：O322 **文献标志码**：A

Review of the structure and application of quasi-zero-stiffness vibration isolation systems

TIAN Haiyang[1], ZHANG Wanfu[1], ZHANG Yang[1], LI Chun[1], CAO Hao[2]
(1. School of Energy and Power Engineering/Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: The isolation of micro-vibrations in spacecraft, low-frequency vibrations in precision instruments, and broadband vibrations in ships and vehicles poses challenges that are difficult for traditional linear vibration isolation systems to address. Quasi-zero-stiffness (QZS) vibration isolation systems, characterized by high static stiffness and low dynamic stiffness, achieve low-frequency vibration isolation without compromising static stiffness. Consequently, they have been a persistent research focus in fields such as micro-vibration, low-frequency vibration, and broadband vibration isolation for scholars globally. This paper introduces the concept of quasi-zero stiffness and its negative stiffness structures. Based on this foundation, various structures are reviewed, highlighting their respective advantages and disadvantages. The applications of QZS vibration isolation systems in areas such as automotive vibration isolation, machinery and manufacturing,

收稿日期：2023－05－15
第一作者：田海洋(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：非线性动力学。E-mail：hytian321@163.com
通信作者：张万福(1986—)，男，教授。研究方向：振动控制、转子动力学。E-mail：wfzhang@usst.edu.cn

and aerospace are summarized. Finally, future research prospects for QZS structures are proposed.

Keywords: quasi-zero-stiffness; negative stiffness; low-frequency vibration isolation; broadband vibration isolation; vibration control

传统隔振系统主要是通过线性弹簧与阻尼器来实现隔振，具有结构简单、应用广泛且技术成熟等优点。然而，传统隔振系统只有在激励频率大于 $\sqrt{2}$倍固有频率时才能发挥隔振效果[1]。线性被动隔振系统的固有频率由自身的刚度和负载质量决定[2]。降低刚度可使隔振系统具有更宽的隔振频带，但会带来静挠度较大、承载能力低以及系统稳定性下降等问题，从而严重制约了线性隔振装置在低频、宽频振动领域的应用。

为缓解低频、宽频隔振问题，在传统线性隔振的基础上结合负刚度结构组成准零刚度隔振器，即在一定的载荷范围内，刚度接近于零且大于零，且固有频率极低的隔振器[2]。负刚度结构最初由斜弹簧组成。随着工程应用的深入，更复杂和稳定的电磁弹簧、滚轮结构、碟形弹簧、气动弹簧等结构被研究和应用。可靠的负刚度结构是设计准零刚度系统的关键[3]。因此，本文总结了不同负刚度结构，并进一步讨论了准零刚度隔振系统在汽车、机械制造、航空航天等领域中的工程应用。

1 负刚度结构

1.1 斜弹簧

斜弹簧是准零刚度系统负刚度结构最经典的形式。Carrella 等[4−6]对斜弹簧式准零刚度隔振系统进行了静力学和隔振分析，并研究了弹簧的几何形状和相对刚度之间的最佳关系、力与位移的传递率。彭献等[7]分析了斜弹簧式准零刚度隔振系统的静力和线性动力特性，以及该系统在随机激励下的力学特性。文献[8−9]对比了以斜弹簧为负刚度结构的准零刚度隔振器和线性结构隔振装置的性能，其结构如图 1 所示，并通过实验证实该准零刚度隔振结构具有优良性能，同时还进一步研究了阻尼对跳跃频率的影响[10]。Zhao 等[11−12]通过改变隔振器的初始位置，使初始位置位于上斜弹簧支撑点与平衡位置之间，从而使静态挠度减小，隔离频带增宽。受动物肢状结构的启发，Zhao 等[13]又对该装置进行了改进和优化。优化后该装置由一个垂直弹簧和三对斜弹簧组成，且通过优化参数使其受杜芬方程非线性项的影响更小。

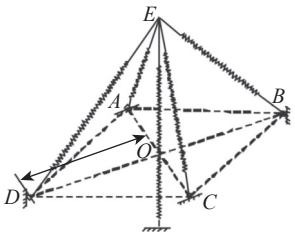


图 1 斜弹簧式准零刚度结构

Fig. 1 Inclined spring type quasi-zero-stiffness structure

斜弹簧结构有以下缺点：①加载后易造成弹簧的横向失稳以及摩擦力的增加，从而导致通过静力学计算的准零刚度点失效。特别是对于一对斜弹簧的准零刚度结构，在较大的激励振幅下，其力的传递率的理论值和实验值有较大误差[12]。弹簧在有预压时可以在静态平衡位置附近获得更宽的低动刚度，但会导致弹簧更易横向失稳。②三弹簧结构具有刚度渐硬的特性，即随着位移的增加其刚度逐渐增加。当系统偏移平衡位置较大时，其整体刚度会增大，隔振效果会差于线性弹簧隔振系统。

1.2 欧拉屈曲梁

有学者研究了屈曲梁压杆刚度和临界载荷的关系，发现当压杆处于临界平衡状态时，压杆仍能保持稳定[14−15]。这些研究表明屈曲梁在隔振领域具有广阔的应用前景。

欧拉屈曲梁更适合于微幅振动。文献[16−17]基于如图 2 所示(θ为屈曲梁与安装基座之间的初始夹角)的屈曲梁模型，分析了该结构的静力学、动力学性能，证实了该结构对低频、微幅振动的适用性。闫健[18]将欧拉屈曲梁应用于卫星

的隔振，结果表明该结构在低频、中频段的隔振性能明显优于线性系统。但是当振幅较大时，该结构会出现频率跳跃现象，且随着振幅减小，非线性现象逐渐消失。

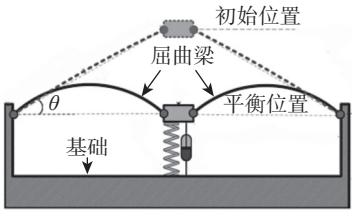


图 2　双屈曲梁式准零刚度结构

Fig. 2　Double buckled beam type quasi-zero-stiffness structure

此外，针对欧拉屈曲梁需注意：①欧拉屈曲梁具有和弹簧类似的刚度渐硬特性。②由于欧拉屈曲梁一直处于屈曲状态，在反复交变力的作用下制作欧拉屈曲梁时应采用具有稳定力学性能的材料。

1.3　电磁弹簧

相比于斜弹簧，电磁弹簧具有无接触、无摩擦的特点。早在 1987 年的一项研究表明一对相互排斥的永磁体可以产生负刚度机制[19]。因此，电磁弹簧在准零刚度领域应用广泛。

(1)电磁弹簧可作为半主动准零刚度隔振装置的元器件。半主动隔振主要通过调节刚度或阻尼[20−21]来实现。半主动隔振结合了主动控制和被动控制的优点，在工程中应用广泛[22−24]。Zhou 等[25−26]利用电磁弹簧组成可调式准零刚度隔振器，通过调节电流实现半主动形式的可调隔振，并测量了被动模式和半主动模式下位移传递率与激励频率之间的关系，研究了隔离器的在线调谐能力。Pu 等[27]研制了一种负刚度可调的紧凑、无接触多层电磁弹簧，由此采用同类型的磁体和线圈，可以制造具有不同刚度特性的各种负刚度元件。

(2)三磁体结构可有效降低系统固有频率。张晓平等[28]分析了三磁体和两磁体结构的差异，结果表明相对于两磁体结构三磁体模型在不影响静载荷的情况下降低了系统在平衡位置的动刚度和固有频率。Wu 等[29]将三磁体作为负刚度结构水平放置，结果表明在不影响载荷的情况下，可以通过改变外磁体和中心磁体的距离来改变该结构的固有频率。谢英江等[30]提出了一种电磁−气动式弹簧，其内部模型也是类三磁体结构。该结构降低了系统的固有频率，其正负刚度可调，可进一步改进并应用于变载荷工况。

(3)电磁弹簧易于集成，可用作多方向的隔振。Zheng等[31]、刘玉成等[32]和 Zhou 等[3]提出了如图 3 所示的Stewart 平台。该平台核心部件是利用内外磁环的排斥作用来产生负刚度，并被集成在圆筒内。该平台可用于多个自由度的隔振。

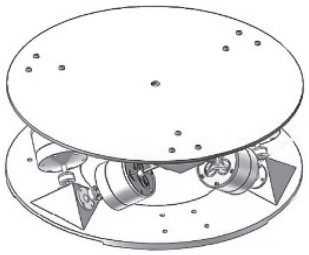


图 3　Stewart 平台

Fig. 3　Stewart platform

电磁弹簧不易造成横向失稳，且结构紧凑、易于集成、灵敏性好，已广泛应用于振动控制系统。此外，金属材料在密闭磁场空间运动时会产生电涡流，从而使负载受到一定的电涡流阻尼力[33]，更有利于低频隔振。

但电磁弹簧还存在以下缺点：①永磁体的磁化、制造和装配的误差会导致实验结果与理论数值有一定的偏差。②针对变压器等结构隔振时，变压器内磁场会影响双磁环的负刚度，因此外壳需要使用防磁材料，否则会导致隔振能力下降。③过高工作温度的环境会对磁弹簧造成不可逆损伤。④双磁环在振动中容易左右摆动，因此需要设计稳定的平台。

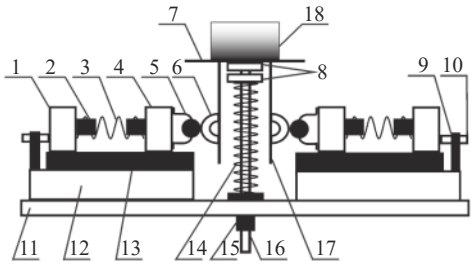
1.4　凸轮−滚轮−弹簧结构

对于准零刚度隔振系统，过小的激励幅值无法体现出系统的优良性能[34]。有研究表明，在小激励幅值下，由于斜弹簧摆角太小，负刚度机构未起作用，因此提出采用滚球机构来代替斜弹簧，从而在产生微幅振动时，使负刚度机构能充分参与其中[35]。

凸轮−滚轮−弹簧结构具有以下优点：

(1)凸轮−滚轮−弹簧结构适用于低频隔振。

王毅等[35]利用谐波平衡法分析了凸轮−滚轮−弹簧模型的系统频响特性及隔振性能，并利用 Adams 软件对系统动力学特性进行仿真及隔振效果评估，研究了激励幅值、阻尼对系统隔振性能的影响。结果表明，当阻尼较大时，激励幅值越小，低频隔振性能越好。Zhou 等[36]对凸轮−滚轮−弹簧隔振器的非线性动态特性进行了研究，指出当压缩比小于 1 但接近 1 时，可以在较小的刚度下实现较大的位移范围[37]。凸轮−滚轮−弹簧隔振器如图 4所示。不同工况下力的传递率测定结果表明，通过引入凸轮−滚轮负刚度机构可有效降低起始隔振频率，抑制共振，提高隔振效果。



1−固定座; 2−水平弹簧连接件; 3−水平弹簧; 4−滑动座; 5−滚轮; 6−凸轮; 7−承重台; 8−卧式轴支撑; 9−立式轴支撑; 10−水平调节轴; 11−支撑基座; 12−垫块; 13−直线导轨; 14−竖直弹簧; 15−轴承; 16−导杆; 17−挡板; 18−被隔振质量

图 4 凸轮−滚轮−弹簧隔振器

Fig. 4 Cam-roller-spring vibration isolator

(2)凸轮−滚轮−弹簧结构紧凑，易于集成，可实现多方向的隔振。肖庆雨等[38]利用凸轮−滚珠−簧片梁结构作为负刚度结构，并将其集成到细杆内，再将多个细杆并联用于多方向的隔振。Zhou 等[39]对凸轮−滚轮−弹簧装置进行了优化，通过并联互斥双磁环做出了更为紧凑的模型，并将准零刚度支柱进行整合用于多方向的隔振。

(3)凸轮−滚轮−弹簧结构可以耦合为两级结构。Wang 等[40]利用两级凸轮−滚轮−弹簧结构进行隔振，结果表明，该结构性能要优于一级凸轮−滚轮−弹簧结构，且对于双层隔振系统具有更快的滚降率[41]。但相对于单层隔振系统，双层隔振系统有额外的质量与刚度，因此有额外的共振频率。另外，双层隔振系统对参数的变化更为灵敏。

(4)凸轮−滚轮−弹簧结构可用于非对称系统。多数研究都是关注针对在平衡点附近的物体进行隔振的对称系统，但是关注针对在平衡点附近的物体进行隔振的非对称系统的研究较少。Cheng 等[42]对恒力作用下准零刚度隔振器的主共振和 1/3 次谐波共振进行了研究，采用谐波平衡法得到了主共振和 1/3 次谐波共振的周期解，研究了激励幅值对非对称系统隔振性能的影响。

准零刚度隔振系统动刚度会随着位移的增大而急剧增大，因此更适用于小振幅隔振。对于凸轮−滚轮结构，小的滚轮凸轮半径比可以增加接触位移，提高隔振效果[36]。但过小的滚轮凸轮半径比会导致系统对振幅较大的激励隔振效果变差，甚至发生滚轮和凸轮分离的情况，致使隔振效果进一步变差。周加喜等[37]通过改变水平弹簧的预压，使负刚度对幅值更为敏感。研究表明，在凸轮−滚轮保持接触的前提下，激励幅值越大，负刚度机构越易发挥作用，隔振效果越显著。大量研究表明，大振幅的激励会导致隔振性能变差[5, 29, 35−36, 43−44]，但是针对解决较大激励幅值下隔振问题的研究相对较少。

值得注意的是，凸轮−滚轮结构具有独特的灵活性，该结构可以在扭转方向上提供负刚度[45−47]，这对于旋转对接等工况下的隔振具有重要意义。

1.5 气动弹簧

气动弹簧具有高承载能力和低固有频率的特点，一直作为高档汽车的隔振装置，是目前隔振效率最高的隔振器之一[18]，已被应用于精密机械与仪器中[48]。在发达国家，空气弹簧在客车上的应用达到 100%，在重型货车上的应用超过 80%[49]。

在准零刚度领域，针对空气弹簧的研究主要集中在变质量物体的隔振。徐道临等[50]利用一个竖直双气室弹簧和四个水平放置的单气室弹簧组成准零刚度隔振器。气动弹簧隔震装置如图 5 所示。该装置可通过调节弹簧的气压来实现变载荷的准零刚度。周嘉诚[51]在空气弹簧的基础上引入柔性结构。该柔性结构可以随着载荷的改变提供合适的负刚度，从而实现变载荷下的准零刚度。邱汉青[52]针对汽车座椅设计了半主动

自适应准零刚度隔振器，并分析了温度对空气弹簧的影响。任旭东[53]针对越野型医用急救车设计了基于空气弹簧的可调式准零刚度隔振系统，并进行了理论分析和道路行驶实验。结果表明，该准零刚度隔振系统在复杂的道路环境下仍具有良好的隔振和缓冲效果，但是变质量时，需要手动调节气压，效率较低。针对质量变化时仍需保持准零刚度的结构的研究较多[9, 25, 37, 50, 54]，但大多需要手动改变初始条件，或者加入半主动控制以适应新的载荷。关于质量自适应的、无需手动改变初始条件的纯被动准零刚度隔振系统的研究相对较少。

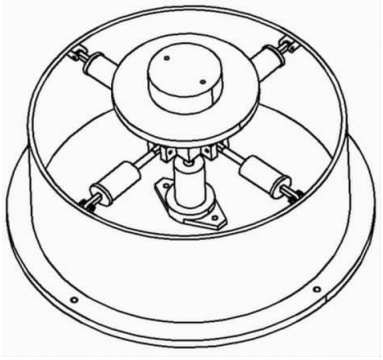


图 5　气动弹簧隔振装置
Fig. 5　Pneumatic spring vibration isolation device

气动弹簧也有一些缺点：①体积较大，不利于集成以用于多自由度的隔振，使用场合受限。②相对于其他弹簧，温度对气动弹簧刚度的影响较大，温度的变化可能会导致准零刚度系统偏离平衡点，从而影响隔振效果，尤其是低频隔振时。③还需要每隔一定时间检查气动弹簧气压，并进行补气。在低频隔振中，准零刚度结构对参数的变化较为敏感，这会导致在隔振要求较高的应用中受限。

近年来针对气动弹簧的研究较多，包括空气动力学、流体力学和工程热力学等理论计算[55−57]，以及基于有限元方法的仿真计算[58−59]。气动弹簧虽然不易集成以用于六自由度的隔振，但在水平方向上的共振频率很低，并且能承受一定的横向载荷和传递弯矩。相对于线性弹簧，气动弹簧具有更好的横向稳定性以及更优异的抗冲击性能。另外，针对较大体积的空气弹簧，单玉虎[60]将互斥双磁环置于空气弹簧内部，从而大大减少了占用空间。

1.6　碟形弹簧

碟形弹簧是将弹簧钢材、耐热钢或镍基高温合金等金属冲压成截面为圆锥状的对称回转体[61]。碟形弹簧结构紧凑，径向尺寸大，轴向尺寸小，小变形下可承载较大载荷[62]，在航天器[63]、卫星[64]等航空航天领域具有广阔的应用前景。在准零刚度领域关于碟形弹簧的研究也十分广泛。

(1)碟形弹簧具有优良的低频隔振性能。徐道临等[65]基于 Abaqus 有限元仿真分析，得到具有准零刚度特性的碟形橡胶隔振器的回复力曲线，并基于谐波平衡法分析了单个碟形弹簧隔振特性，结果表明单层碟形橡胶弹簧具有优良的低频隔振性能。

(2)碟形弹簧可通过结构优化获得更优异的隔振性能。牛福等[66]针对救护车的隔振缓冲，提出了一种开槽式的准零刚度隔振器(如图 6 所示)。相同负载下，相对于标准碟形弹簧，开槽式碟形弹簧可获得更大的低刚度区间，隔振效果更好。孟令帅[67]对比分析了等厚碟形弹簧和渐厚碟形弹簧分别作为负刚度结构时的隔振性能，并分别利用平均法和马蒂厄方程判别法分析了系统的稳定性，结果表明渐厚碟形弹簧在平衡位置附近具有更小的刚度和更大的小刚度范围。彭丽娟等[64]采用有限元方法研究了非标准开槽碟形弹簧的特性，并指出非标准开槽碟形弹簧可以满足在卫星上的使用需求。

图 6　开槽式碟形弹簧
Fig. 6　Slotted disc spring

(3)碟形弹簧所占空间更小，更易集成在细杆内，以用于多方向的隔振。宋春芳等[68]将碟形弹簧和螺旋弹簧并联后耦合在细杆内，设计出一种用于六方向的准零刚度隔振床，并分析了高厚比、正负刚度比、元件和竖直方向的夹角等因

素对隔振效果的影响。

总体来说：①碟形弹簧结构紧凑，变形小，易于集成。②当单片碟形弹簧的变形量和复合值不能满足使用要求时，可将弹簧组合使用，且组合后抗压力强。③针对不同工况，可以对碟形弹簧进行针对性的结构优化以获得更优异的隔振性能。④碟形弹簧还可被应用于大质量房屋的隔振[69]。

但是碟形弹簧也存在以下缺点：①碟形弹簧在制作过程中即便出现小的偏差也会导致其特性出现较大的误差[64]，因此将其用作高精度弹簧时，对材料和制造工艺要求很高。所以针对低频、超低频的准零刚度隔振系统，需要精度更高的制造工艺来保证碟形弹簧的载荷偏差在允许范围内。②对于非标准开槽碟形弹簧刚度特性的研究较少，且针对特定工况开发的特定开槽碟形弹簧的理论计算和参考资料十分有限。③碟形弹簧更容易变形，导致其寿命变短[70]。

1.7 剪刀型结构

剪刀型结构也称为 X 型结构，这类折展结构因其收拢状态几何包络小而被广泛运用于对执行机构具有严格几何限制的场合[71]，最早多用于笔记本电脑薄键盘、折叠伞、折叠桌椅等。剪刀型结构因其受力均匀、可展性好、组合方便[72]，在航空航天中的操作机械臂[73−74]、月球探测车[75]等航空航天领域有广泛应用。在准零刚度隔振领域，剪刀型结构具有以下优点：

(1)剪刀型结构具有优异的平衡稳定性。柳阳[76]建立了如图 7 所示的剪刀型结构，利用 Adams 和 Matlab 软件进行隔振分析，并优化了数学模型。Sun 等[77]讨论了装配角、层数等结构参数对非线性刚度和阻尼的影响，并对比了其他种类的隔振器，结果表明剪刀型结构拥有更优异的动态性能。该研究还将时滞反馈控制引入非线性隔振器[78]，实现了对不同频段隔振效果的改善。Jiang 等[79]受仿生关节的启发，进一步优化 X 型结构，使优化后的 X 型结构可以更灵活地调整动态刚度特性，结构尺寸更紧凑，承载能力更强。

(2)剪刀型准零刚度结构在无重力环境下的隔振和抗冲击能力优异。尹蒙蒙[80]分别对无重力和重力环境下剪刀型准零刚度隔振器的静、动力学性能进行分析，为剪刀型准零刚度隔振器在太空领域的应用做出了理论拓展。研究表明剪刀型结构可用于隔离在轨卫星抓捕目标时产生的冲击和周期性激励[81]。

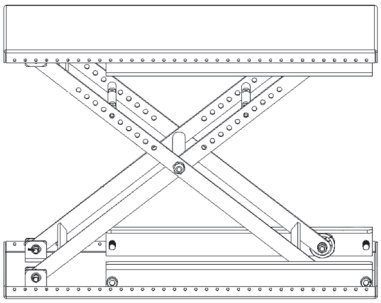


图 7 剪刀型结构平台

Fig. 7 Scissor-type structure platform

(3)剪刀型结构可通过结构设计实现多自由度的隔振。Guo 等[82]在多个方向上设计剪刀型结构，并利用 Adams 软件对该结构进行隔振分析。Wu 等[83]将 X 型结构应用于 Stewart 平台，实现了多自由度的隔振，并分析了刚度比、层数、安装角度等对隔振性能的影响。

总体上，剪刀型结构一直是国内外学者研究的热点，在建筑学、结构学、航空航天等方面都有十分深入的应用。但剪刀型结构大多应用于单自由度的隔振，相对于其他形式的负刚度结构来说，其多自由度的设计和数值计算较为繁琐。

2 准零刚度隔振器的应用现状

2.1 汽车隔振

应用于汽车的准零刚度隔振装置较多。早在 1989 年，陈树年等[84]便提出将负刚度结构引入到汽车座椅的隔振中。Lee 等[85]提出利用薄壁结构作为负刚度结构，用于汽车座椅的隔振，并进行了详细的数值分析。Le 等[54, 86]针对准零刚度结构在座椅中的隔振进行了详细分析，并建立运动学微分方程并得到计算近似解，通过数值分析和实验论证了准零刚度结构在汽车隔振中的优良性能。但该系统无法对不同质量物体隔振提供解决方案，因此该学者又提出了一个主动系统来解决变质量问题[87]。文献[88−91]建立了基于准

零刚度隔振结构的八自由度车−座椅−人耦合动力学模型，并对汽车座椅的非线性进行了详细研究，又将时滞反馈控制系统引入准零刚度隔振结构以获得更好的低频隔振性能。

针对单轨车辆的二系悬挂，陈志辉等[92]对比分析了传统的线性隔振系统和准零刚度隔振系统，结果表明准零刚度隔振装置在汽车隔振中表现优异。针对低成本的两座新能源汽车中普通的多层碟形弹簧刚度较大无法满足要求这一情况，郑剑宇[93]提出将多片碟形弹簧与普通弹簧组合得到新型准零刚度悬架来解决汽车悬挂的减振问题。吴波等[94]提出了利用膜片碟形弹簧代替普通碟形弹簧，并通过实验证实膜片碟形弹簧具有更优异的低频隔振性能。针对卡车驾驶室低频振动，殷金祥等[95]结合轻卡驾驶室悬置的特点，即其前悬置是旋转机构，后悬置是橡胶支撑机构，设计出一种更具针对性的悬置准零刚度系统。该系统对车载精密仪器隔振具有更好的低频隔振效果。张施祥[96]探讨了准零刚度结构在车载精密仪器隔振应用中的可能性，并着重推导了准零刚度被动隔振系统的主谐波共振、亚谐波共振和超谐波共振的幅频表达式及其动力特性。针对车载光电设备的隔振，杜宁等[97]提出了将平行四边形结构和正刚度弹簧并联的准零刚度隔振系统，以实现水平两个方向上的隔振。

2.2　机器及机械制造隔振

高精度加工、高精密测量仪器对环境振动的要求非常高，例如分子坐标测量机、空间微重力研究及引力波探测等领域要求隔离 0.5 Hz 的微幅振动，因此准零刚度隔振在低频、超低频下效果优于线性系统，具有更广泛的工程适用性[98]。

针对飞机制造车间的环境振动，赵晨名[99]将机器人自动制孔系统和准零刚度系统相结合，并提出通过变刚度抑制共振、通过变阻尼抑制系统非线性影响的方案，从而进一步缩小振动对机器手臂精度和效率造成的影响。

孟庆国[100]针对康复型机器人进行了深入研究，在机器人关节等支撑部位利用准零刚度结构进行减振，以避免机器人的“刚性体质”对患者造成二次伤害。

2.3　航空航天

尹蒙蒙[80]分析了无重力和重力作用下的准零刚度隔振器性能，为准零刚度在航空航天领域的应用进行了理论拓展。针对卫星中成像设备的隔振，闫健[18]提出了将欧拉梁与线性弹簧并联的隔振装置，并进行了仿真和实验分析，结果表明其在低频下具有优异的隔振性能。卫星等设备，一般配置动量轮、陀螺和太阳翼等转动部件，因此在无重力环境下工作时产生的微振动会对数据产生一定的影响[101]。理想的卫星隔振频带最低为 0.2 Hz，振幅低至 μm 级[102]，特别是高分辨率的光学遥感卫星，其对于隔振的要求更为严苛[103]。由于大多数准零刚度隔振结构在超低频下的隔振效果不明显，目前该结构多与主动程序的控制相结合以达到更好的隔振效果[104−107]。近年来，纯被动隔振在航空航天领域的应用逐渐成为热点。

3　准零刚度隔振器的展望

针对准零刚度的研究对于低频隔振具有重要意义。随着准零刚度隔振系统在超低频、微振动领域的应用深入，人们对准零刚度结构提出了更高的要求。关于准零刚度隔振器的发展有以下几点展望：

(1)负刚度结构正在以越来越紧凑的形式出现，以便耦合在细杆内来实现多自由度的隔振，以及应用于一些空间受限的场合。

(2)传统准零刚度隔振装置无法应对变质量工况，因此研制能够成比例改变正负刚度以实现对质量自适应的隔振装置愈发重要。

(3)开展隔振结构两级及以上的耦合研究。两级隔振系统的隔振性能明显优于单级隔振系统。已有学者对凸轮−滚轮结构进行了两级隔振的分析和实验[40]。但针对双磁环结构或者碟形弹簧等结构的两级隔振结构的研究还较为鲜见。另外，利用耦合准零刚度隔振和颗粒吸振来达到更好隔振效果的研究也鲜有报道。

(4)准零刚度结构会在某些低频下仍具有共振波峰，因而学者大多通过主动控制系统或者增大阻尼来提高低频下的隔振效果，但是主动控制系统需要额外的动力输入，增大阻尼则会降低高频隔振效果。可实现低频高阻尼、高频低阻尼的

变阻尼材料正得到越来越多学者的关注和研究。

(5)针对大振幅隔振的准零刚度结构的研究有待深入。准零刚度结构针对微振幅、小振动的情况具有较好的隔振效果。大量研究表明，在大振幅情况下，准零刚度的隔振效果变差，但针对这方面的研究相对较少。

(6)新型材料的研究。具有更优异性能的负刚度结构，如流体折纸[108]、新型圆柱[109]等结构近些年被提及，这些结构对准零刚度结构的发展具有突破性的意义。

参考文献：

[1] 丁文镜. 减振理论 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2014.

[2] 彭献, 黎大志, 陈树年. 准零刚度隔振器及其弹性特性设计 [J]. 振动、测试与诊断, 1997(4): 44 - 46.

[3] ZHOU J X, WANG K, XU D L, et al. A six degrees-of-freedom vibration isolation platform supported by a hexapod of quasi-zero-stiffness struts[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2017, 139(3): 034502.

[4] 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(3−5): 678 - 689.

[5] 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, 322(4−5): 707 - 717.

[6] 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(1): 22 - 29.

[7] 彭献, 张施详. 一种准零刚度隔振系统的静力与线性动力特性分析 [J]. 力学季刊, 2012, 33(3): 492 - 498.

[8] 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.

[9] XU D L, ZHANG Y Y, ZHOU J X, et al. On the analytical and experimental assessment of the performance of a quasi-zero-stiffness isolator[J]. Journal of Vibration and Control, 2014, 20(15): 2314 - 2325.

[10] 徐道临, 余奇平, 周加喜, 等. 准零刚度隔振系统跳跃频率区间隔振研究 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(2): 230 - 235.

[11] ZHAO F, JI J C, LUO Q T, et al. An improved quasi-zero stiffness isolator with two pairs of oblique springs to increase isolation frequency band[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 104(1): 349 - 365.

[12] ZHAO F, JI J C, YE K, et al. Increase of quasi-zero stiffness region using two pairs of oblique springs[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144: 106975.

[13] ZHAO F, JI J C, YE K, et al. An innovative quasi-zero stiffness isolator with three pairs of oblique springs[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 192: 106093.

[14] LESTARI W, HANAGUD S. Nonlinear vibration of buckled beams: some exact solutions[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(26−27): 4741 - 4757.

[15] NAYFEH A H, EMAM S A. Exact solution and stability of postbuckling configurations of beams[J]. Nonlinear Dynamics, 2008, 54(4): 395 - 408.

[16] 刘兴天, 孙靖雅, 肖锋, 等. 准零刚度微振动隔振器的原理和性能研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 69 - 73.

[17] LIU X T, HUANG X C, HUA H X. On the characteristics of a quasi-zero stiffness isolator using Euler buckled beam as negative stiffness corrector[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(14): 3359 - 3376.

[18] 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.

[19] YONNET J P. Passive magnetic bearings with permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1978, 14(5): 803 - 805.

[20] SUN S S, YANG J, LI W H, et al. Development of a novel variable stiffness and damping magnetorheo logical fluid damper[J]. Smart Materials and Struc tures, 2015, 24(8): 085021.

[21] LIU Y Q, MATSUHISA H, UTSUNO H. Semi-active vibration isolation system with variable stiffness and damping control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 313(1−2): 16 - 28.

[22] ZHANG X Z, LI W H, ZHOU Y. A variable stiffness MR damper for vibration suppression[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent

Mechatronics. Singapore: IEEE, 2009: 106−111.

[23] ZHOU Y, WANG X Y, ZHANG X Z, et al. Variable stiffness and damping magnetorheological isolator[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2009, 4(3): 310 − 315.

[24] MIN C Q, DAHLMANN M, SATTEL T. A concept for semi-active vibration control with a serial-stiffness-switch system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 405: 234 − 250.

[25] ZHOU N, LIU K. A tunable high-static-low-dynamic stiffness vibration isolator[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(9): 1254 − 1273.

[26] ZHOU N B, LIU K F. Characterization of an electromagnetic vibration isolator[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2011, 3(12): 519 − 528.

[27] PU H Y, YUAN S J, PENG Y, et al. Multi-layer electromagnetic spring with tunable negative stiffness for semi-active vibration isolation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 942 − 960.

[28] 张晓平, 何琳, 周炜. 基于一种新型磁致负刚度结构的低频隔振系统分析与设计 [J]. 船舶工程, 2015, 37(9): 45 − 48, 67.

[29] WU W J, CHEN X D, SHAN Y H. Analysis and experiment of a vibration isolator using a novel magnetic spring with negative stiffness[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(13): 2958 − 2970.

[30] 谢英江, 牛福, 孟令帅, 等. 一种电磁–气动式准零刚度隔振器设计与分析 [J]. 医疗卫生装备, 2021, 42(9): 13 − 17, 24.

[31] ZHENG Y S, LI Q P, YAN B, et al. A Stewart isolator with high-static-low-dynamic stiffness struts based on negative stiffness magnetic springs[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 422: 390 − 408.

[32] 刘玉成, 何强, 罗永利, 等. 变压器准零刚度隔振平台非共振响应 [J]. 应用力学学报, 2020, 37(6): 2463 − 2469.

[33] 李爽, 楼京俊, 杨庆超, 等. 双环永磁体型高静低动刚度隔振器设计、建模与试验研究 [J]. 振动工程学报, 2019, 32(4): 675 − 684.

[34] 赵智. 气动可调式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.

[35] 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.

[36] ZHOU J X, WANG X L, XU D L, et al. Nonlinear dynamic characteristics of a quasi-zero stiffness vibration isolator with cam-roller-spring mechanisms [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 346: 53 − 69.

[37] 周加喜, 王心龙, 徐道临, 等. 含凸轮-滚轮机构的准零刚度系统隔振特性实验研究 [J]. 振动工程学报, 2015, 28(3): 449 − 455.

[38] 肖庆雨, 周加喜, 徐道临, 等. 一种六自由度准零刚度隔振平台 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 258 − 264.

[39] ZHOU J X, XIAO Q Y, XU D L, et al. A novel quasi-zero-stiffness strut and its applications in six-degree-of-freedom vibration isolation platform[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 394: 59 − 74.

[40] WANG X L, ZHOU J X, XU D L, et al. Force transmissibility of a two-stage vibration isolation system with quasi-zero stiffness[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 87(1): 633 − 646.

[41] 陆泽琦, 陈立群. 非线性被动隔振的若干进展 [J]. 力学学报, 2017, 49(3): 550 − 564.

[42] CHENG C, LI S M, WANG Y, et al. Resonance response of a quasi-zero stiffness vibration isolator considering a constant force[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2018, 6(6): 471 − 481.

[43] 王心龙. CRSM 准零刚度隔振器的非线性隔振特性及实验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.

[44] TANG B, BRENNAN M J. On the shock performance of a nonlinear vibration isolator with high-static-low-dynamic-stiffness[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 81: 207 − 214.

[45] YE K, JI J C, BROWN T. A novel integrated quasi-zero stiffness vibration isolator for coupled translational and rotational vibrations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107340.

[46] ZHOU J X, XU D L, BISHOP S. A torsion quasi-zero stiffness vibration isolator[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 338: 121 − 133.

[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.

[48] 张士义, 张先彤, 张庆春, 等. 超精密加工中的隔振技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(S1): 379 − 384.

[49] 何锋, 龙明源, 杨洪江, 等. 商用车空气弹簧的研究现状及发展趋势 [J]. 农机化研究, 2005, 27(3): 262 − 265.

[50] 徐道临, 赵智, 周加喜. 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.

[51] 周嘉诚. 变载荷工作条件下准零刚度系统特性分析

[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
[52] 邱汉青. 基于空气弹簧力学特性的汽车座椅载荷自适应隔振仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
[53] 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: 中国人民解放军军事医学科学院, 2017.
[54] LE T D, AHN K K. A vibration isolation system in low frequency excitation region using negative stiffness structure for vehicle seat[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(26): 6311 – 6335.
[55] 应杏娟, 李郝林, 倪争技. 空气弹簧隔振器的动力特性研究 [J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(2): 164 – 168.
[56] 王汉刚, 帅长庚, 郭伟, 等. 气囊隔振器垂向阻抗及其传递特性研究 [J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(6): 192 – 194.
[57] 原亮明, 宫相太, 刘爽堃, 等. 铁道车辆空气弹簧垂向动态特性分析方法的研究 [J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 37 – 41.
[58] 李锋祥, 杨卫民, 丁玉梅. APDL 实现空气弹簧动态试验仿真 [J]. 特种橡胶制品, 2007, 28(4): 50 – 54,70.
[59] HONCHI M, KOHIRA H, MATSUMOTO M. Numerical simulation of slider dynamics during slider-disk contact[J]. Tribology International, 2003, 36(4–6): 235 – 240.
[60] 单玉虎. 并联磁负刚度的新型空气弹簧减振器设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
[61] 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
[62] 秦代成, 周文凤, 李慧瑾. 碟形弹簧制造工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(22): 232 – 234.
[63] 王英浩, 李文斌, 王川云, 等. 基于有限元的航天器用碟形弹簧优化设计 [J]. 导弹与航天运载技术, 2013(6): 51 – 55.
[64] 彭丽娟, 黎月明, 马玉贵, 等. 卫星用非标准开槽碟形弹簧加工工艺的研究 [J]. 航天制造技术, 2013(3): 41 – 44.
[65] 徐道临, 周杰, 周加喜, 等. 碟形橡胶准零刚度隔振器的设计和特性分析 [J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2015, 42(8): 22 – 28.
[66] 牛福, 任旭东, 孟令帅, 等. 一种准零刚度隔振缓冲器设计机理与应用研究 [J]. 医疗卫生装备, 2015, 36(5): 34 – 36.
[67] 孟令帅. 新型准零刚度隔振器的设计和特性研究 [D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2015.
[68] 宋春芳, 顾黄森, 刘彦琦, 等. 准零刚度隔振床静态特性分析 [J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2127 – 2133.
[69] ZHOU Y, CHEN P, MOSQUEDA G. Analytical and numerical investigation of quasi-zero stiffness vertical isolation system[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2019, 145(6): 04019035.
[70] 罗昌森, 罗宏, 冯淳, 等. 60Si2Mn 钢碟形弹簧热处理工艺改进 [J]. 金属热处理, 2014, 39(6): 80 – 83.
[71] 徐坤, 乔安伟, 丁希仑. 剪叉弯曲折展变胞机构的设计与分析 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 55 – 62.
[72] 杨毅, 丁希仑. 剪式单元可展机构静力学分析与拓扑优化设计 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(2): 184 – 189.
[73] 肖航, 杨巧龙, 任守志, 等. 大型套接式展收机构接头设计分析及刚度试验研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 1 – 10.
[74] 杨毅, 丁希仑. 基于空间多面体向心机构的伸展臂设计研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 26 – 34.
[75] 李端玲, 张忠海, 于振. 球面剪叉可展机构的运动特性分析 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 1 – 7.
[76] 柳阳. 基于剪刀架构型振动隔离动力学研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
[77] SUN X T, JING X J. Analysis and design of a nonlinear stiffness and damping system with a scissor-like structure[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66–67: 723 – 742.
[78] SUN X T, WANG F, XU J. Dynamics and realization of a feedback-controlled nonlinear isolator with variable time delay[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2019, 141(2): 021005.
[79] JIANG G Q, JING X J, GUO Y Q. A novel bio-inspired multi-joint anti-vibration structure and its nonlinear HSLDS properties[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106552.
[80] 尹蒙蒙. X 型准零刚度隔振器动力学设计及分析 [D]. 上海: 上海大学, 2021.
[81] 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.
[82] GUO L C, KHIU A, FAN R L, et al. Analysis of a passive scissor-like structure isolator with quasi-zero stiffness for a seating system vibration-isolation application[J]. International Journal of Vehicle Design, 2020, 82(1–4): 224.
[83] WU Z J, JING X J, SUN B, et al. A 6DOF passive vibration isolator using X-shape supporting structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016,

380: 90 − 111.

[84] 陈树年, 黄天泽, 彭献. 汽车座椅弹性元件刚度的探讨 [J]. 湖南大学学报, 1989, 16(3): 14 − 20.

[85] LEE C M, GOVERDOVSKIY V N, TEMNIKOV A I. Design of springs with “negative” stiffness to improve vehicle driver vibration isolation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(4−5): 865 − 874.

[86] LE T D, AHN K K. Experimental investigation of a vibration isolation system using negative stiffness structure[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 70: 99 − 112.

[87] DANH L T, AHN K K. Active pneumatic vibration isolation system using negative stiffness structures for a vehicle seat[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(5): 1245 − 1268.

[88] 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.

[89] 王勇. 汽车座椅的非线性准零刚度隔振技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

[90] WANG Y, LI S M, CHENG C, et al. Dynamic analysis of a high-static-low-dynamic-stiffness vibration isolator with time-delayed feedback control[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015: 712851.

[91] WANG Y, LI S M, CHENG C, et al. Adaptive control of a vehicle-seat-human coupled model using quasi-zero-stiffness vibration isolator as seat suspension[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(7): 2973 − 2985.

[92] 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 − 17,40.

[93] 郑剑宇. 基于准零刚度原理的新型被动悬架设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

[94] 吴波, 艾星然. 准零刚度悬架的低频隔振仿真分析 [J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(3): 127 − 134.

[95] 殷金祥, 岳涛, 王军龙. 卡车驾驶室准零刚度悬置系统设计研究 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46(21): 98 − 100.

[96] 张施祥. 一种准零刚度隔振系统及其在车载精密仪器隔振中的应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.

[97] 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.

[98] 张建卓, 董申, 李旦. 基于正负刚度并联的新型隔振系统研究 [J]. 纳米技术与精密工程, 2004, 2(4): 314 − 318.

[99] 赵晨名. 基于准零刚度的机器人制孔系统半主动环境振动抑制方法 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.

[100] 孟庆国. 机器人支撑关节准零刚度隔振系统设计与研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.

[101] 曹启鹏, 李永昌, 董小静, 等. 卫星微振动对测风激光雷达信噪比影响研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 092802.

[102] 董瑶海, 周徐斌, 申军烽, 等. FY-4 卫星微振动抑制技术研究 [J]. 上海航天, 2017, 34(4): 20 − 27.

[103] 王嘉登, 张高雄, 茅敏, 等. 卫星控制力矩陀螺微振动抑制装置的动力学建模与实验研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 1 − 7.

[104] COBB R G, SULLIVAN J M, DAS A. Vibration isolation and suppression system for precision payloads in space[J]. Smart Materials and Structures, 1999, 8(6): 798.

[105] SPANOS J, RAHMAN Z, BLACKWOOD G. A soft 6-axis active vibration isolator[C]//Proceedings of 1995 American Control Conference. Seattle: IEEE, 1995: 412-416.

[106] 谢溪凌, 王超新, 陈燕毫, 等. 一种 Stewart 隔振平台的动力学建模及实验研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 201 − 207.

[107] 张尧, 黄庭轩, 徐世杰. 星上控制力矩陀螺群隔振平台的动力学特性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(1): 80 − 85.

[108] SADEGHI S, LI S Y. Fluidic origami cellular structure with asymmetric quasi-zero stiffness for low-frequency vibration isolation[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(6): 065006.

[109] TAN X J, WANG B, CHEN S, et al. A novel cylindrical negative stiffness structure for shock isolation[J]. Composite Structures, 2019, 214: 397 − 405.