

负刚度研究综述

郑 皓

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2026年6月17日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年7月22日

摘 要

负刚度是一种特殊的等效刚度特性, 其主要表现为结构在某一工作区间内外力与位移增量方向相反。与传统正刚度系统相比, 负刚度单元本身通常不能单独稳定工作, 但当其与正刚度、阻尼或惯性元件合理组合后, 可以显著降低系统等效动态刚度, 从而改善低频隔振和减振性能。近年来, 负刚度结构在准零刚度隔振、精密仪器隔振、航天器微振动控制、车辆与船舶振动控制、建筑结构减振以及机械超材料等领域受到广泛关注。本文围绕负刚度的基本概念、物理实现原理、动力学挑战、工程应用和发展趋势进行综述。首先阐明负刚度与准零刚度、高静刚度低动刚度之间的关系; 然后按照负刚度形成的物理机制, 将典型实现方式归纳为几何非线性型、失稳型、势能重构与多稳态型、场力型以及结构单元与机械超材料型; 接着将低频隔振、稳定性、非线性频响、参数敏感性和阻尼耦合等内容整合为“负刚度系统的动力学挑战与关键科学问题”, 重点讨论稳定工作区间、跳跃与分岔、多参数匹配和安全边界识别; 最后总结当前研究中存在的参数调节能力不足、工程验证不充分和可靠性评价体系不完善等问题, 并对可调负刚度、多向隔振、智能材料耦合和真实工况试验研究进行展望。综述表明, 负刚度技术为低频振动控制提供了有效思路, 但其工程应用仍需要在稳定性设计、参数优化和试验验证方面进一步完善。

关键词

负刚度, 准零刚度, 物理实现原理, 非线性动力学, 稳定性

Review of Research on Negative Stiffness

Hao Zheng

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: June 17, 2026; accepted: July 9, 2026; published: July 22, 2026

Abstract

Negative stiffness is a unique equivalent stiffness property characterized by an opposite incremental relationship between force and displacement within a specific operating range. Compared with traditional positive-stiffness systems, negative-stiffness elements usually cannot work stably on

their own; however, when they are properly combined with positive-stiffness, damping, or inertial elements, the equivalent dynamic stiffness of the system can be significantly reduced, thereby improving low-frequency vibration isolation and vibration mitigation performance. In recent years, negative-stiffness structures have attracted increasing attention in quasi-zero-stiffness vibration isolation, precision instrument isolation, spacecraft micro-vibration control, vehicle and ship vibration control, civil structural vibration reduction, and mechanical metamaterials. This review discusses the basic concepts, physical implementation principles, dynamic challenges, engineering applications, and development trends of negative stiffness. First, the relationship among negative stiffness, quasi-zero stiffness, and high-static-low-dynamic stiffness is clarified. Then, typical implementations are reorganized according to their physical mechanisms, including geometric-nonlinearity type, instability type, potential-energy-reconfiguration and multistable type, field-force type, and structural-unit/metamaterial type. Subsequently, the contents related to low-frequency isolation, stability, nonlinear frequency response, parameter sensitivity, and damping coupling are integrated into an independent section entitled “dynamic challenges and key scientific issues of negative-stiffness systems”. The discussion focuses on stable operating ranges, jump and bifurcation phenomena, multi-parameter matching, and identification of safe operating boundaries. Finally, current issues such as insufficient parameter adjustability, inadequate engineering verification, and incomplete reliability assessment are summarized, and future directions, including adjustable negative stiffness, multi-directional isolation, intelligent-material coupling, and tests under realistic operating conditions, are discussed. The review indicates that negative-stiffness technology provides an effective approach for low-frequency vibration control, but further work is still required in stability design, parameter optimization, and experimental validation before broader engineering application.

Keywords

Negative Stiffness, Quasi-Zero Stiffness, Physical Implementation Principle, Nonlinear Dynamics, Stability

Copyright © 2026 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

振动问题广泛存在于机械工程、车辆工程、土木工程、航空航天和精密制造等领域。传统被动隔振系统多由质量、弹簧和阻尼器组成，其结构简单、可靠性高、维护成本低，因此在工程中应用较多。但是，传统线性隔振系统存在一个明显矛盾：若要提高承载能力，需要较大的静刚度；若要提高低频隔振能力，则需要降低系统固有频率，而固有频率降低又要求系统刚度减小。这就导致传统隔振系统难以同时满足“大承载能力”和“低频隔振能力”两个要求。

为了解决这一矛盾，研究人员提出了高静刚度低动刚度系统。该类系统在静态状态下具有较高承载能力，在平衡位置附近又具有较低动态刚度。负刚度单元正是实现这一特性的关键方法之一。负刚度不是指材料刚度为负，而是指结构或机构在某一位移区间内表现出等效刚度为负，即力-位移曲线的局部斜率小于零。由于负刚度单元本身容易失稳，因此实际应用中通常将其与正刚度元件并联，使系统在整体上保持静态稳定，同时降低平衡位置附近的动态刚度。

准零刚度隔振系统是负刚度研究中最典型的方向。该系统通常由正刚度元件提供静承载能力，由负刚度元件抵消部分正刚度，使系统在平衡位置附近的等效刚度接近零。这样既能保证被隔振对象不发生

明显静沉降,又能降低系统固有频率,从而改善低频隔振性能。Alabuzhev 等较早系统讨论了准零刚度系统在振动防护和测量系统中的应用[1]。Platus 将负刚度机构用于精密仪器和光学平台隔振,推动了负刚度隔振器的工程化研究[2] [3]。Carrella 等对准零刚度隔振器的静力特性、优化设计和力传递率进行了系统研究,为后续理论分析提供了重要基础[4]-[7]。近年来,随着柔性机构、磁弹簧、双稳态结构、折纸结构和机械超材料的发展,负刚度技术的结构形式和应用范围不断扩展[8]-[13]。

国内对负刚度和准零刚度隔振也开展了大量研究。早期研究主要集中在负刚度工作原理和非线性隔振理论方面[14]-[16]。近年来,研究重点逐渐转向正负刚度并联隔振、磁负刚度隔振、双稳定层合板隔振、恒值准零刚度隔振以及多维低频隔振等方向[17]-[21]。这些研究表明,负刚度技术在低频微振动控制方面具有明显优势,但其稳定性、非线性响应和工程适应性仍然是需要解决的关键问题。

因此,本文以负刚度研究为对象,从基本概念、物理实现原理、动力学挑战、工程应用和发展趋势几个方面进行综述。与按具体结构名称简单罗列不同,本文首先按照负刚度形成的物理机制对典型结构进行归类;随后将动力学响应、稳定性、非线性行为和发展问题中的相关内容集中讨论,形成“负刚度系统的动力学挑战与关键科学问题”章节,以突出负刚度系统从理论设计走向工程应用时必须解决的核心问题。

2. 负刚度的基本概念与力学机理

刚度通常表示结构抵抗变形的能力。对于线性弹簧,弹簧力与位移成正比,力-位移曲线的斜率为正,因此称为正刚度。负刚度则不同。当结构在某一工作区间内位移增大而回复力反而减小,或外力增量与位移增量方向相反时,该区间可表现为负刚度。用数学形式表示,若系统力-位移关系为 $F = f(x)$,则局部切线刚度为 $k = \frac{dF}{dx}$ 。当 $k < 0$ 时,系统处于负刚度区间。

需要说明的是,负刚度并不意味着系统整体一定不稳定。单独的负刚度元件通常难以稳定存在,但当其与正刚度元件组合时,可以形成稳定的等效系统。对于正负刚度并联系统,等效刚度可写为:

$$k_e = k_p + k_n$$

其中, k_p 为正刚度, k_n 为负刚度。当 $k_n < 0$ 且 $|k_n| < k_p$ 时,系统等效刚度仍然为正,但其数值明显小于 k_p 。这样可以在保持系统稳定的基础上降低动态刚度。如果 $|k_n|$ 接近 k_p , 则 k_e 接近零,系统具有准零刚度特性;如果 $|k_n|$ 大于 k_p , 则系统等效刚度为负,容易发生静态失稳。因此,负刚度系统的核心不是简单追求负刚度越大越好,而是在承载能力、低频性能和稳定性之间取得平衡。

从物理实现原理看,负刚度的形成并不依赖单一结构形式,而是可以由不同能量转换和力传递机制产生。第一类是几何非线性型,通过斜置弹簧、剪式机构、X 型机构、曲柄滑块或圆环结构改变力的传递方向,使竖向回复力在局部区间内随位移增加而减小。第二类是失稳型,主要利用梁、板、壳等构件屈曲后的下降刚度段形成负刚度。第三类是势能重构与多稳态型,通过双稳态或多稳态结构的势能曲线设计,在状态转换路径上获得负刚度区间。第四类是场力型,利用永磁力、电磁力或其他可控场力随位移变化产生等效负刚度。第五类是结构单元与机械超材料型,通过单元构型、周期阵列和局部共振等设计实现宏观等效负刚度或低动刚度。这种按物理机制分类的方式有助于比较不同负刚度结构的适用范围和工程限制。

从振动控制角度看,负刚度的主要作用是降低系统固有频率。传统单自由度系统固有频率与刚度和质量有关。当等效刚度降低时,固有频率随之降低。低固有频率意味着系统可以在更低频率范围内进入隔振区。因此,负刚度技术特别适合低频隔振、微振动控制和精密设备防护。然而,负刚度也会带来非

线性响应、跳跃现象、稳定区间缩小和参数敏感等问题，这些问题决定了负刚度系统必须进行稳定性和动力学分析。

3. 负刚度的物理实现原理与典型结构

3.1. 几何非线性型负刚度机构

几何非线性型负刚度机构通过改变构件几何关系和力的传递方向，使系统在平衡位置附近形成局部负刚度。斜置弹簧是最典型的形式。其基本结构是在竖向正刚度弹簧两侧布置斜向弹簧，斜向弹簧的轴向力可分解为竖向分力。当被隔振质量发生竖向位移时，斜向弹簧竖向分力的变化方向可能与位移方向相反，从而抵消部分正刚度并形成低动刚度区间。Carrella 等对竖向弹簧与斜置弹簧并联的准零刚度隔振器进行了静力分析，指出几何参数和弹簧刚度之间存在匹配关系，可使系统在静平衡位置附近获得接近零的动态刚度[4] [5]。

除斜置弹簧外，剪式机构、X 型机构、曲柄滑块机构和圆环结构也属于几何非线性型实现方式。这类结构的共同特点是建模直观、参数含义清楚，便于开展原理样机试验。Sun 等提出的剪式结构平台和 Lu 等提出的圆环非线性隔振结构，都说明几何构型设计可以有效调节低频隔振性能[10] [11]。但是，几何非线性型机构对安装尺寸、铰接间隙、预压量和承载质量变化较敏感。当实际平衡位置偏离设计点时，原有准零刚度区间会移动，系统性能可能明显下降。因此，该类机构适合固定载荷或可调预压条件下的低频隔振设计。

3.2. 失稳型负刚度结构

失稳型负刚度结构主要利用弹性构件屈曲后的力学特性。细长梁、薄板、壳体或柔性片在轴向压力作用下可能发生屈曲。屈曲后，结构力 - 位移曲线可能出现下降段，这一段的切线刚度为负。与斜置弹簧机构相比，失稳型结构通常更加紧凑，能够减少传统运动副和摩擦副，便于与柔性机构或微型隔振装置集成。国内研究中，屈曲板和正负刚度并联隔振器已被用于低频隔振系统设计，并对其静态特性和动力学响应进行了分析[17]。

失稳型结构的核心问题是“可利用负刚度区间”与“整体稳定性”之间的矛盾。屈曲能够提供明显的负刚度，但若系统越过设计位移范围，可能进入强非线性区、二次屈曲区或局部失稳区。为提高安全性，实际设计常将屈曲梁、屈曲板与线性正刚度弹簧、导向机构、限位装置和阻尼元件组合使用。这样可以在保留低动刚度优势的同时，避免负刚度元件单独工作导致的静态失稳。

3.3. 势能重构与多稳态型负刚度结构

势能重构与多稳态型负刚度结构通过设计势能函数的形状来获得多个稳定平衡点。双稳态层合板、弯曲梁、壳结构和折纸结构均可形成类似特性。当结构从一个稳定状态向另一个稳定状态跃迁时，中间通常存在势能峰值和不稳定路径，对应的力 - 位移曲线会出现负斜率区间。与单一弹簧或连杆机构相比，多稳态结构能够在较小空间内实现更明显的刚度变化，因此在冲击吸能、能量捕获和低频隔振方面具有研究价值。

邓泽华等基于双稳定层合板构造准零刚度隔振系统，利用层合板自身的非线性特性降低了传统负刚度机构的结构复杂程度[18]。这类方法说明，负刚度不仅可以通过外加机构实现，也可以通过材料 - 结构一体化设计形成。不过，多稳态结构往往伴随跳跃、突变和路径依赖现象。在连续振动或随机激励下，系统可能在不同势阱之间转换，从而产生复杂响应。因此，多稳态型负刚度结构应重点关注激励幅值、能量势垒和状态转换条件。

3.4. 场力型负刚度机构

场力型负刚度机构利用非接触力随位移变化形成等效负刚度，其中最常见的是磁负刚度。永磁体之间的吸引力或排斥力具有明显非线性。当磁体按照特定空间关系布置时，磁力-位移曲线可在局部区间呈现负斜率，从而提供负刚度。Carrella 等将线性机械弹簧与磁体结合，设计了高静刚度低动刚度隔振器[6]；Xu 等对具有准零刚度特征的非线性磁隔振器进行了理论和试验研究[9]；国内也有研究采用螺旋柔性弹簧与磁性弹簧并联的方式实现低频隔振[17]。

场力型结构的优势在于无接触、无磨损、易于调节，并且适合微振动控制和精密设备隔振。通过改变磁体间距、磁体排布或电磁线圈电流，可以在一定范围内调节负刚度大小。但是，场力型结构也存在建模和工程应用难点。磁力高度非线性，磁体安装误差会改变目标负刚度曲线；强磁场可能影响周围传感器和电子设备；永磁体性能还可能受到温度变化影响。因此，该类系统通常需要磁场计算、试验标定和稳定性分析相结合。

3.5. 结构单元与机械超材料型负刚度结构

结构单元与机械超材料型负刚度结构强调从局部单元出发设计整体等效力学性能。柔性梁、柔性铰链、圆环单元、折纸单元和周期性结构都可以通过单元构型产生低动刚度或负刚度特性。柔性机构具有无间隙、无摩擦、结构集成度高等优点，适用于小型化和高精度隔振场景。机械超材料则通过周期阵列、局部共振、负泊松比单元或多稳态单元实现特殊刚度调控和波传播控制。

与传统单个负刚度机构相比，机械超材料具有可设计性强、易阵列化和多功能集成等优势。其研究对象不仅限于低频隔振，还包括冲击防护、能量吸收和弹性波带隙调控。Ma 等对准零刚度隔振系统的进展进行了综述，指出结构构型与多功能集成是该方向的重要趋势[13]。不过，超材料和柔性单元通常对制造精度、材料一致性和边界约束较敏感。其等效模型与真实结构之间可能存在偏差，因此仍需要通过样机试验和真实工况测试验证其可靠性。

3.6. 不同实现方式的适用边界

从工程选择角度看，不同负刚度实现方式并不存在绝对优劣，而是对应不同应用边界。几何非线性型机构结构清晰，适合原理验证和中低载荷隔振；失稳型结构紧凑，但要重点控制屈曲区间和疲劳寿命；多稳态型结构适合需要大刚度变化或能量势阱调控的场合，但要避免非预期跳跃；场力型结构便于非接触调节，但对磁场建模、温度和电磁兼容性要求较高；结构单元与机械超材料型结构适合集成化和轻量化设计，但其制造精度和模型等效问题仍需重视。因此，负刚度结构设计应从载荷水平、目标频带、允许位移、环境条件和维护要求出发进行综合选择。

4. 负刚度系统的动力学挑战与关键科学问题

4.1. 低频隔振性能与等效刚度调谐边界

负刚度系统的主要优势是改善低频隔振性能。传统线性隔振系统只有当激励频率高于一定倍数的固有频率时，才能取得明显隔振效果。若要降低固有频率，传统方法通常需要降低正刚度，但这会削弱承载能力。负刚度单元与正刚度单元并联后，可以在保持静态承载能力的同时降低平衡位置附近的等效动态刚度，从而降低系统固有频率并提前进入隔振区。Carrella 等关于准零刚度隔振器的静力分析、参数优化和力传递率研究，为这一类系统的低频隔振理论提供了基础[4]-[7]。

但是，低等效刚度并不意味着负刚度越大越好。负刚度过小，低频隔振效果有限；负刚度过大，系统总刚度可能接近零甚至变为负值，静态稳定性将受到破坏。因此，等效刚度调谐的关键不只是使固有

频率降低,而是确定“低动刚度-静态承载-稳定裕度”之间的可行区域。对于工程装置,还应考虑加工误差、安装误差、温度变化、载荷漂移和摩擦等因素对等效刚度曲线的影响。

4.2. 静态稳定性、平衡点迁移与工作区间

稳定性是负刚度系统区别于普通正刚度系统的核心问题。单独的负刚度元件通常难以稳定工作,必须通过正刚度元件、阻尼元件、限位机构或控制策略形成整体稳定系统。对于正负刚度并联系统,设计时需要保证工作点附近总切线刚度大于零,并预留足够稳定裕度。若承载质量发生变化,系统静平衡位置会移动,原本设计的准零刚度区间可能偏离工作点,导致隔振性能下降或过量位移。

因此,负刚度系统的第一个关键科学问题是如何在变载荷和变工况下保持稳定工作区间。该问题不仅涉及静力曲线设计,还涉及多工况下的平衡点跟踪、限位保护和参数自适应调节。常见方法包括设置正刚度裕度、扩大准零刚度平台区、增加机械限位、调节弹簧预压量、改变磁体间距、引入电磁控制或半主动调节等。这些方法的目标不是消除负刚度,而是在可控范围内利用负刚度。

4.3. 非线性频响、跳跃与分岔问题

负刚度系统通常具有明显非线性。在小幅振动下,系统可近似在线性化工作点附近运动,频率响应相对稳定;当激励幅值增大时,系统会离开准零刚度区间,刚度随位移显著变化,可能表现为软化非线性、硬化非线性或软硬组合特性。在正弦激励下,幅频响应曲线可能发生弯曲,并出现多值响应、跳跃和滞回现象。Ibrahim 对非线性被动隔振器的研究进展进行了总结,说明非线性隔振系统的频响分析必须考虑激励幅值和稳定分支[22]。

非线性并不完全是负面因素。适当的非线性可以降低低频响应、拓宽隔振频带或提升能量吸收能力;但过强或不可控的非线性会带来响应不确定性。对于双稳态、多稳态和屈曲型负刚度结构,系统还可能出现分岔、跨阱运动甚至复杂非周期响应。由此形成第二个关键科学问题:如何在利用非线性优势的同时,避免跳跃、分岔和失稳进入工程不可接受区域。解决这一问题需要将静力曲线、幅频曲线、稳定分支和试验响应统一分析。

4.4. 参数敏感性与鲁棒性设计

负刚度系统的性能通常依赖多个参数共同匹配,包括正刚度、负刚度、预压量、阻尼比、质量、几何尺寸、磁体间距和初始平衡位置等。准零刚度隔振器对这些参数尤其敏感。某一参数发生小幅偏差,可能导致系统由低动刚度状态转变为普通正刚度状态,甚至进入不稳定区。因此,仅给出理想参数下的隔振效果是不够的,还需要分析参数扰动下的性能变化。

鲁棒性设计应回答三个问题:第一,哪些参数对固有频率、传递率峰值和跳跃边界影响最大;第二,实际制造和装配误差是否会使系统偏离安全工作区;第三,在载荷和激励变化时,系统是否仍能保持可接受隔振效果。针对这些问题,可采用参数敏感性分析、多目标优化、可靠性设计和试验标定等方法。对于工程应用,更应给出允许载荷范围、允许位移范围和参数调节范围,而不是只给出单一最优工况。

4.5. 阻尼、惯性与负刚度耦合机制

阻尼是负刚度系统稳定运行的重要因素。低阻尼系统在共振区容易出现较大响应,增加阻尼可以降低响应峰值并提高稳定性;但阻尼过大又可能削弱高频隔振效果。由于负刚度系统本身具有非线性刚度,阻尼与刚度非线性会共同影响幅频曲线、跳跃边界和能量耗散路径。因此,阻尼设计不能只照搬线性隔振系统经验,而应结合系统的非线性刚度曲线进行分析。

负刚度还可以与惯性元件或惯容元件耦合。负刚度主要改变系统等效刚度和固有频率，惯性或惯容元件则可以改变系统的频域动力特性和能量传递路径。二者耦合后，有可能在不显著增加实体质量的情况下拓展低频控制能力。但这种耦合也会带来更多参数匹配问题，如负刚度大小、等效惯性、阻尼和调谐频率之间的协调。由此形成第三个关键科学问题：如何建立包含负刚度、阻尼和惯性效应的统一动力学模型，并通过试验识别其有效参数。

4.6. 试验识别与安全工作边界

负刚度系统的动力学分析最终需要通过试验验证。理论模型通常会简化摩擦、间隙、连接柔度、材料滞回和温度影响，而这些因素在实际装置中可能明显改变力-位移曲线和动力响应。因此，负刚度系统不应只验证某一频率点的隔振效果，还应识别完整的静力特性、动态等效刚度、阻尼特性和安全位移边界。

较合理的试验思路包括：首先通过准静态加载获得力-位移曲线和切线刚度曲线，确定负刚度区间；然后通过扫频或定频激励获得传递率、幅频响应和共振峰变化；再在不同载荷、不同预压量和不同激励幅值下检查跳跃、碰限和失稳风险。对于面向工程应用的负刚度装置，还应补充疲劳寿命、温度适应性、长期稳定性和失效模式测试。只有明确安全工作边界，负刚度系统才能从理论模型和小样机走向实际工程应用。

5. 负刚度技术的工程应用

5.1. 精密仪器与光学平台隔振

负刚度隔振最早的重要应用之一是精密仪器和光学平台隔振。精密测量设备、光学显微系统、半导体制造设备和激光实验平台对环境微振动十分敏感。传统橡胶隔振器或空气弹簧在低频范围内隔振能力有限，而负刚度隔振器可以在较低频率下提供有效隔振。Platus 的研究和相关产品应用表明，负刚度机构在精密仪器隔振领域具有较高实用价值[2] [3]。

5.2. 航天器微振动控制

航天器在轨运行时，动量轮、控制力矩陀螺、太阳帆板驱动机构和制冷机等部件会产生微振动。这些微振动会影响高分辨率遥感载荷、空间望远镜和精密指向系统的工作性能。由于航天器对质量、体积和可靠性要求严格，低频微振动隔振具有较高难度。正负刚度并联隔振器、磁负刚度隔振器和柔性准零刚度隔振器为航天器微振动控制提供了可行方案[17] [21]。

5.3. 车辆、船舶与机械设备隔振

车辆座椅、发动机悬置、船舶推进轴系和机械设备基础都存在低频振动问题。传统隔振系统在低频段容易出现大幅响应，而负刚度结构可以降低系统固有频率，改善低频隔振效果。船舶与车辆工况通常具有宽频、变幅和强扰动特点，因此单一固定参数负刚度机构可能难以适应。未来可将负刚度与半主动阻尼、可调刚度和多自由度隔振平台结合，提高系统对复杂工况的适应能力。

5.4. 土木结构减振

在土木工程中，负刚度也被用于建筑结构和桥梁结构减振。其基本思想是利用负刚度元件改变系统等效刚度和能量传递路径，降低地震或风荷载作用下的响应。与传统阻尼器相比，负刚度装置可以在较小附加刚度或特定调谐条件下提高减振效果。但是，土木结构荷载大、变形复杂、服役时间长，因此负刚度装置在土木工程中应用时需要特别关注承载安全、耐久性、极端荷载下的失效模式和维护便利性。

6. 当前问题与发展趋势

6.1. 可调负刚度与宽工况适应

在前述动力学问题之外，负刚度技术的工程发展首先取决于参数调节能力。传统机械式负刚度机构通常依靠固定几何参数和预压量获得目标刚度，一旦加工和装配完成，调节范围有限。实际工程对象的质量、安装条件和激励环境往往会发生变化，固定参数系统容易偏离最佳工作点。因此，可调负刚度是未来研究的重要方向。通过调节弹簧预压量、改变杆件几何位置、调整磁体间距、控制电磁力或引入半主动执行元件，可以使负刚度系统适应不同载荷和不同激励条件。

可调设计的关键不只是扩大调节范围，还要保证调节过程的可重复性和安全性。若调节机构本身引入较大摩擦、间隙或附加刚度，可能抵消负刚度系统的低频优势。因此，未来研究需要将可调机构设计、参数识别方法和闭环控制策略结合起来，形成面向宽工况的负刚度调节方案。

6.2. 多向隔振与多自由度耦合

现有负刚度研究多集中在单自由度竖向隔振模型，而工程结构中的振动通常具有多向耦合特征。精密仪器、车辆座椅、船舶设备基础和建筑结构在实际工况下都可能同时受到竖向、水平向、扭转或冲击作用。若只考虑单一方向，可能无法准确评价系统在真实工况下的隔振和减振能力。

因此，多向隔振和多自由度耦合是负刚度技术进一步发展的重要方向。未来可将正负刚度并联机构、柔性导向、磁负刚度单元和多自由度平台结合，建立可同时控制竖向和水平向响应的系统。此类系统需要解决方向间刚度耦合、模态耦合、空间安装尺寸和多参数调谐等问题。

6.3. 工程化试验、可靠性与失效模式

负刚度技术虽然在理论和小尺寸样机方面取得了较多成果，但工程化验证仍然不足。很多研究主要关注理想模型下的频域隔振效果，对实际装置中的摩擦、间隙、制造误差、疲劳寿命、温度影响、连接可靠性和长期稳定性讨论不够。对于土木结构、车辆设备和航天器等应用场景，负刚度系统还必须满足安全冗余、维护便利性和极端荷载下的可控失效要求。

未来研究应从单纯的模型验证转向真实工况下的性能评估。试验内容应包括静态标定、扫频试验、随机激励试验、冲击试验、长期疲劳试验和环境适应性测试。特别是对于具有屈曲、多稳态或磁场作用的负刚度系统，应明确可能的失效模式，如屈曲构件疲劳、限位碰撞、磁体退磁、连接松动、运动副磨损和控制失效等。

6.4. 多功能集成与智能化发展

负刚度可以与阻尼、惯容、智能材料和机械超材料结合，形成更高性能的振动控制系统。例如，负刚度与磁流变阻尼结合可以实现可调耗能；负刚度与惯容元件结合可以拓展频域控制能力；负刚度与柔性超材料结合可以实现轻量化、阵列化和波传播控制。这些方向能够突破单一负刚度机构的性能限制，具有较大的研究价值。

智能化发展还需要解决传感、识别和控制问题。未来负刚度系统可结合位移、加速度和力传感器，对工作点、响应幅值和稳定裕度进行在线监测，并根据工况变化调整负刚度、阻尼或惯性参数。对于工程应用而言，智能化不应只追求控制算法复杂，而应服务于安全、可靠和可维护的目标。

7. 结论

本文对负刚度研究进行了综述，主要结论如下。

第一，负刚度是一种局部等效刚度特性，其本质是结构力-位移曲线在特定区间内呈现负斜率。负刚度单元本身通常难以单独稳定工作，但与正刚度元件组合后，可以降低系统等效动态刚度，并保持一定静态承载能力。

第二，按照物理实现原理，负刚度结构可归纳为几何非线性型、失稳型、势能重构与多稳态型、场力型以及结构单元与机械超材料型。该分类方式比单纯按结构名称罗列更能体现负刚度形成机理，也便于比较不同结构的适用边界。

第三，负刚度系统的核心问题不仅是获得低频隔振效果，还包括静态稳定性、工作区间、非线性频响、跳跃与分岔、参数敏感性、阻尼耦合和试验安全边界等动力学挑战。这些问题共同决定了负刚度系统能否从理论模型走向工程应用。

第四，负刚度技术在精密仪器、航天器微振动控制、车辆与船舶设备隔振以及土木结构减振中具有应用潜力。不同工程场景对承载能力、安装空间、环境适应性和可靠性的要求不同，因此负刚度系统必须结合具体工况进行设计和验证。

第五，未来负刚度研究应重点关注可调负刚度、多向隔振、多自由度耦合、真实工况试验、可靠性评价以及智能材料、阻尼器、惯容器和机械超材料的集成应用。只有在稳定性设计、参数优化和工程化试验方面进一步完善，负刚度技术才能更好地服务于低频振动控制。

参考文献

- [1] Alabuzhev, P.M., Gritchin, A., Kim, L., Migirenko, G., Chon, V. and Stepanov, P. (1989) Vibration Protecting and Measuring Systems with Quasi-Zero Stiffness. Taylor & Francis.
- [2] Platus, D.L. (1992) Negative-Stiffness-Mechanism Vibration Isolation Systems. *SPIE Proceedings*, **1619**, 44-54. <https://doi.org/10.1117/12.56823>
- [3] Platus, D.L. (1999) Negative-Stiffness-Mechanism Vibration Isolation Systems. *SPIE Proceedings*, **3786**, 98-105. <https://doi.org/10.1117/12.363841>
- [4] Carrella, A., Brennan, M.J. and Waters, T.P. (2007) Static Analysis of a Passive Vibration Isolator with Quasi-Zero-Stiffness Characteristic. *Journal of Sound and Vibration*, **301**, 678-689. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.10.011>
- [5] Carrella, A., Brennan, M.J. and Waters, T.P. (2007) Optimization of a Quasi-Zero-Stiffness Isolator. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **21**, 946-949. <https://doi.org/10.1007/bf03027074>
- [6] Carrella, A., Brennan, M.J., Waters, T.P. and Shin, K. (2008) On the Design of a High-Static-Low-Dynamic Stiffness Isolator Using Linear Mechanical Springs and Magnets. *Journal of Sound and Vibration*, **315**, 712-720. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.01.046>
- [7] Carrella, A., Brennan, M.J., Kovacic, I. and Waters, T.P. (2009) On the Force Transmissibility of a Vibration Isolator with Quasi-Zero-Stiffness. *Journal of Sound and Vibration*, **322**, 707-717. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.11.034>
- [8] Liu, C., Jing, X., Daley, S. and Li, F. (2015) Recent Advances in Micro-Vibration Isolation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **56**, 55-80. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.10.007>
- [9] Xu, D., Yu, Q., Zhou, J. and Bishop, S.R. (2013) Theoretical and Experimental Analyses of a Nonlinear Magnetic Vibration Isolator with Quasi-Zero-Stiffness Characteristic. *Journal of Sound and Vibration*, **332**, 3377-3389. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.01.034>
- [10] Sun, X., Jing, X., Xu, J. and Cheng, L. (2014) Vibration Isolation via a Scissor-Like Structured Platform. *Journal of Sound and Vibration*, **333**, 2404-2420. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.12.025>
- [11] Lu, Z., Gu, D., Ding, H., Lacarbonara, W. and Chen, L. (2020) Nonlinear Vibration Isolation via a Circular Ring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **136**, Article ID: 106490. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106490>
- [12] Yan, G., Wu, Z., Wei, X., Wang, S., Zou, H., Zhao, L., et al. (2022) Nonlinear Compensation Method for Quasi-Zero Stiffness Vibration Isolation. *Journal of Sound and Vibration*, **523**, Article ID: 116743. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116743>
- [13] Ma, Z., Zhou, R. and Yang, Q. (2022) Recent Advances in Quasi-Zero Stiffness Vibration Isolation Systems: An Overview and Future Possibilities. *Machines*, **10**, Article 813. <https://doi.org/10.3390/machines10090813>
- [14] 彭献, 陈树年, 宋福磐. 负刚度的工作原理及应用初探[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1992, 19(4): 89-94.

-
- [15] 彭献, 唐驾时. 非线性隔振理论初探[J]. 振动与冲击, 1996, 15(4): 13-17, 36, 93.
- [16] 彭献, 黎大志. 准零刚度隔振器及其弹性特性设计[J]. 振动、测试与诊断, 1997, 17(4): 44-46.
- [17] 董光旭, 罗亚军, 严博, 张希农. 基于正负刚度并联的低频隔振器研究[J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2189-2199.
- [18] 邓泽华, 李昊, 周徐斌. 基于双稳定层合板的准零刚度隔振系统[J]. 振动与冲击, 2020, 39(21): 116-125.
- [19] 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.
- [20] 田海洋, 张万福, 张扬, 李春, 曹浩. 准零刚度隔振系统结构综述[J]. 能源研究与信息, 2026, 42(1): 33-43.
- [21] 赵峰, 霍亚奇, 陈鹿民, 杜文辽, 曹树谦, 冯桂珍. 双对斜杆负刚度机制的恒值 QZS 隔振器研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(2): 52-59.
- [22] Ibrahim, R.A. (2008) Recent Advances in Nonlinear Passive Vibration Isolators. *Journal of Sound and Vibration*, **314**, 371-452. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.01.014>