

负泊松比超材料减振结构设计 with 实验验证

王奕霖 秦卫阳[†] 刘琦

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

摘要 旋转机械的转子部件发生故障时, 振幅会迅速增大甚至发散, 此时需要一种轻质高效的吸能减振结构, 快速控制转子部件的振动幅值. 本文基于负泊松比材料概念, 提出了一种针对转子系统的负泊松比弧形超材料减振结构, 可以实现很好的故障转子减振效果. 首先, 通过释放自由度提出了负泊松比非对称星形胞单元, 设计了针对转子的超材料减振结构, 并给出了相应的能量吸收指标. 然后, 基于有限元模型进行了动力学仿真, 讨论了不同冲击速度、不同冲击角度对能量吸收性能的影响. 结果表明, 低速冲击下, 材料主要产生弹性变形吸能. 随着冲击速度增加, 材料变为弹塑性变形混合吸能模式, 有效吸能率会明显增大. 特别是在冲击速度较大时, 减振结构的吸能率会迅速增加, 这对于转子突发故障的减振十分有利. 最后, 设计了验证实验, 对故障转子进行了负泊松比减振结构的验证实验. 实验结果证明, 对于转子的不平衡故障响应, 设计的减振结构能够起到很好的抑制转子振动与吸收振动动能效果.

关键词 负泊松比, 转子系统, 能量吸收, 减振结构

中图分类号: V231.96

文献标志码: A

A Vibration Attenuation Structure Based on Negative Poisson Ratio Metamaterial and Its Experimental Validation

Wang Yilin Qin Weiyang[†] Liu Qi

(School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract For rotor components in a rotating machinery, if there occurs a fault, the rotor's vibration will increase rapidly and even result in serious damage. So the rotor needs a type of vibration energy absorption structure that has the feature of light weight and high energy absorption ratio. In this study, based on the negative Poisson ratio (auxetic) metamaterial, we propose an asymmetric star unit cell with negative Poisson ratio, and then design an arc-shaped vibration attenuation structure suited for the rotor system. First, the unit cell of negative Poisson ratio is proposed and the metamaterial vibration attenuation structure is designed. Then, the collision model is established and corresponding simulation is carried out. The influences of some key parameters are investigated, e.g., the impact velocity and impact angle. It is found that for the low impact speed, the large impact angle will lead to a good energy absorption ratio; for the medium impact speed, the small impact angle will give a good energy absorption. Especially, for the high impact speed, the structure experiences plastic deformation and can reach a high energy absorption ratio. Finally, corresponding validation experiment was carried out on a rotor setup. For a rotor with two disks, the imbalance fault is produced. The experimental results show that the proposed negative-Poisson-ratio structure can attenuate the rotor vibration significantly, and absorb the vibration kinetic energy effectively.

Key words negative Poisson ratio, rotor system, energy absorption, metamaterial vibration attenuation structure

引言

航空发动机、燃气轮机的转子部件转速很高,发生故障时,振动会迅速增大发散,如不及时进行减振控制,会造成严重事故.另一方面,由于重量限制,减振结构,又必须体积小、重量轻.因此,高速转子系统迫切需要一种结构简单、重量轻、吸能效果好的减振结构.近年来出现的负泊松比蜂窝材料在这方面具有优势,其在材料压溃的过程中可以取得很高的吸能效果^[1-3].负泊松比蜂窝结构是一种新型的轻质材料,其独有的负泊松比效应使其在保持多孔材料轻便性的基础上,拥有更好的能量吸收特性.一些学者针对这种材料研究了其分析方法与材料特性.朱绍涛等^[4]开展了其非线性分析方法的.通过建立曲线坐标与 Poincaré 映射,发展了高维 Melnikov 方法,应用于负泊松比蜂窝夹层板的多周期运动等复杂非线性动力学分析,获得了系统周期轨道的存在性、个数及相应的参数控制条件.张新春等^[5]建立了领结形负泊松比蜂窝结构,发现材料的面内冲击性能与扩张角有关,冲击速度越大,材料吸能效果越好.崔世堂等^[6]通过仿真研究发现,对于领结形胞元负泊松比材料,在面内冲击下,能量吸收效果更多地取决于冲击速度.另外,在同样冲击速度下,扩张角越大则吸能比越小.Meng 等^[7]通过理论与有限元研究,发现负泊松比效应会使得蜂窝材料的等效弹性模量增大.熊飞扬等^[8]进行了泡沫铝子弹高速冲击负泊松比星形蜂窝夹心板的实验,结果表明,在局部荷载作用下,增大胞元壁厚会使得材料失效模式从压缩失效向弯曲失效变化.Ai 等^[9]基于卡式定理与 Timoshenko 梁理论提出了各向异性星形胞元等效力学参数的计算方法.Alomarah^[10]对比研究了内凹手性结构(RCA)、传统六边形蜂窝结构和领结形结构的面外吸能效果,发现 RCA 材料具有最大的面外能量吸收能力.Balawi^[11]考虑了蜂窝材料由于加工误差导致的胞元斜壁交点弯曲,给出了由弯曲处曲率表达的六边形蜂窝材料等效弹性模量的表达式.

同时,通过组合不同的胞元结构或改变胞元的

基本几何参数,多种功能性负泊松比结构也被设计出来.富展展等^[12]基于刚柔耦合负泊松比材料单元,建立了隔振结构模型,对比不同角度下单元结构的固有频率以及带隙范围进行了研究,得到最优单元隔振模型,实现了理想的带隙功能.Gao 等^[13]通过实验和理论推导的方法,设计了压溃强度会随着冲击速度和相对密度的增大而增大的双箭型蜂窝结构(DAH).Guo 等^[14]通过组合六边形蜂窝和领结形负泊松比蜂窝,设计了一种在准静态和动态压缩下有更好的能量吸收特性的零泊松比(ZPR)蜂窝结构.Fu 等^[15]通过将窄壁菱形结构嵌入领结形胞元,在尽可能不损失负泊松比材料吸能特性的基础上,得到了一种比传统多孔材料刚度更大的负泊松比胞元.Qi 等^[16]将领结形胞元的内凹侧斜壁部分替换为弧面,得到了一种新的领结-弧形胞元(REC).Su 等^[17]将正弦曲线形柔性拱臂引入领结形结构,在增加材料刚度、减小压缩下斜壁交点屈曲程度的同时,仍能保持较好的负泊松比效应.尹冠生等^[18]基于功能梯度材料的概念,改变蜂窝胞壁厚,建立了具有密度梯度的内凹六边形负泊松比蜂窝超材料,对比了均匀和梯度负泊松比材料在冲击速度下的变形模式、动态响应和能量吸收特性,发现梯度负泊松比材料初始应力峰值低,能量吸收效果好.Yang 等^[19]基于双 V 层级结构(DVHs),将连接处进行圆滑处理,得到了双 U 层级结构,可以避免材料加工过程中损伤.另外,还提出了很多其他特征的功能负泊松比蜂窝材料,如具有平台应力阶段特征的负泊松比材料等^[20, 21].

负泊松比蜂窝超材料结构是转子系统减振的一种理想结构,但是目前这方面的研究成果还很少.本文针对这个问题,考虑了转子系统结构与动力学特征,提出了非对称星形单元,设计了弧形负泊松比超材料减振结构,能够在转子系统振动过大时实现高效吸能减振.

1 负泊松比胞单元模型

1.1 非对称星形胞单元设计

为了适应转子的运动特征,设计了负泊松比不

对称星形胞单元,其结构如图 1 所示,各项几何参数如表 1 所示。

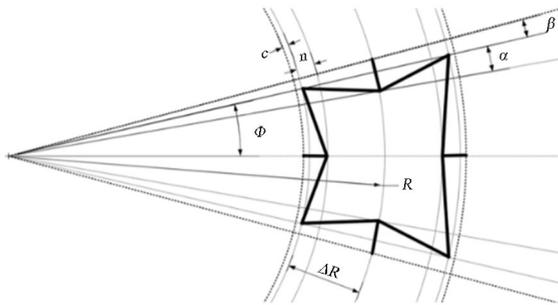


图 1 极坐标下的单元结构
Fig.1 Cell structure in polar coordinate

表 1 胞单元几何参数

Table 1 Geometric parameters of unit cell

参数	定义	数值
n	径向凹点深度	0.75 mm
ϕ	胞元包络线夹角	7.76°
α	环向凹点夹角	1.56°
ΔR	半胞元厚度	7.5 mm

R 为胞单元中心距迎冲面曲率中心的距离,此处对于最内侧胞元,为 55.5mm。

1.2 圆盘冲击负泊松比结构模型

转子运动中冲击负泊松比减振结构的过程,与常见的负泊松比材料冲击压溃的力学过程不同,转子和材料之间的接触并非常见的均匀压溃,而是局部冲击接触.因此在研究中,以圆盘代替平板作为冲击面进行研究;同时,圆盘并非如同压溃实验中冲击平面那样以固定的速度压缩材料,而是以一定的初动能冲击超材料,然后产生回弹。

负泊松比超材料在面内冲击下的能量吸收会受到多个因素的影响.对于冲击体,首先是由于加速度以及外界激励等参数的不同,转子在运动过程中会以不同的角度冲击超材料结构,这会导致材料对于转子动能吸收效率的变化.其次,不同的面内冲击速度会导致不同的蜂窝结构变形模式,从而也导致能量吸收效果的变化。

具体仿真时,对于整个负泊松比非对称星形胞单元超材料结构,在 z 方向施加约束.然后,圆盘以一定初速度,按照不同冲击角 θ 冲击超材料结构,采用罚函数方法防止穿透.超材料结构的参数如表 2 所示。

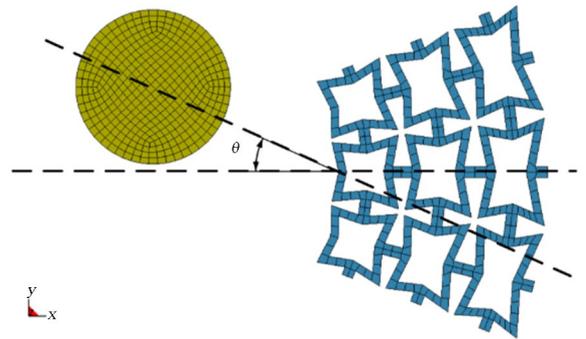


图 2 转子以冲击角 θ 冲击负泊松比结构模型
Fig.2 model of disk and NPR metamaterial with θ impact angle

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

部件	拉胀材料	圆盘
材质	尼龙	碳钢
弹性模量 E	1602MPa	206GPa
密度 ρ	1300kg/m ³	7850kg/m ³
泊松比 ν	0.45	0.3

1.3 能量吸收指标

本次研究中,冲击圆盘是以一定的初始动能进行局部的冲击,会产生由于速度不足,接触面积较小导致的蜂窝不充分压溃,因此不使用蜂窝完全压溃下的吸能指标来衡量,而是通过圆盘的始末动能之差来确定材料的动能吸收量,即

$$\Delta E = | E_{k1} - E_{k0} | \quad (1)$$

另外,不同冲击速度下,能量吸收值的差距很大,很难比较材料的吸能特性,因此进一步给出总能量吸收率,即:

$$D_E = \frac{\Delta E}{E_{k0}} \quad (2)$$

其表示吸收的能量占总能量比例。

除此之外,还需要考察材料的塑性与弹性变形对能量的贡献.对于弹性变形吸收的能量,能量会在动能与弹性势能之间转化,不能作为完全吸收的能量.因此,定义 E_{km} 与 E_{im} 分别为盘与超材料结构分离后,结构在后续振动中的平均动能与平均内能.则可以定义弹性吸能比 p_e 与有效吸能比 p_p ,定义式如下:

$$p_e = \frac{E_{km}}{\Delta E} \quad (3)$$

$$D_E = \frac{E_{im}}{\Delta E} \quad (4)$$

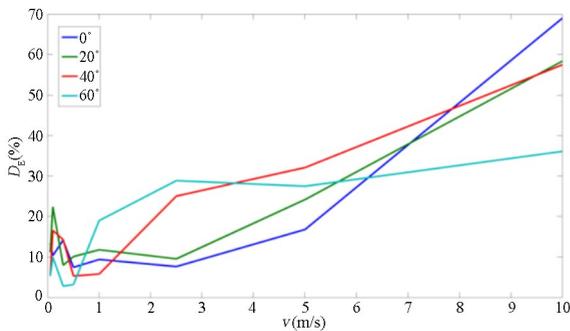
其中 P_e 为弹性变形吸收的能量与总吸能之比, P_p

为塑性变形吸收的能量与总吸能之比.在实际碰撞中,弹性变形的势能还会释放出去,而塑性变形能是被吸收的能量.因此 P_p 越大,则被塑性变形有效吸收的能量越多,因此可以定义有效能量吸收率为:

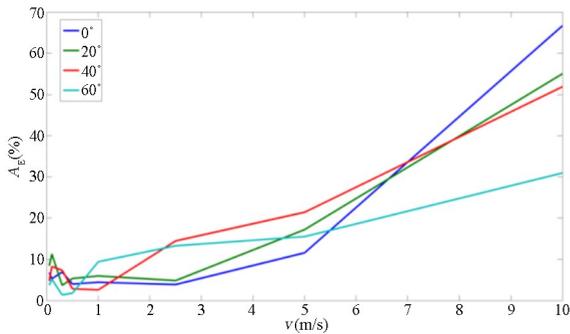
$$A_E = D_E P_p \quad (5)$$

1.4 仿真计算结果及分析

对于建立的模型,采用动力学有限元仿真模拟了转子盘碰撞超材料结构后的吸能效果.变化参数为转子盘的冲击速度 v 与冲击角 θ ,其中速度 v 的取值为 $v = 1.0\text{m/s}$ 、 5.0m/s 、 10.0m/s ;冲击角变化为 $\theta = 0^\circ$ 、 20° 、 40° 、 60° .



(a) 能量吸收率
(a) Energy absorption ratio



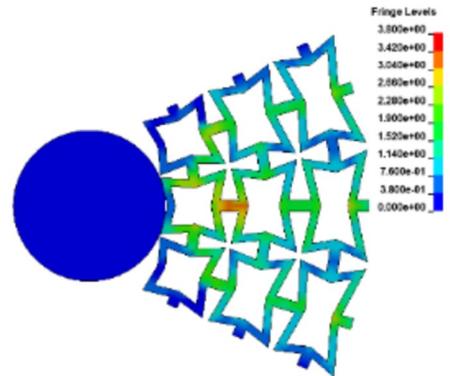
(b) 有效能量吸收率
(b) Effective energy absorption ratio
图3 材料能量吸收

Fig.3 Energy absorption of materials

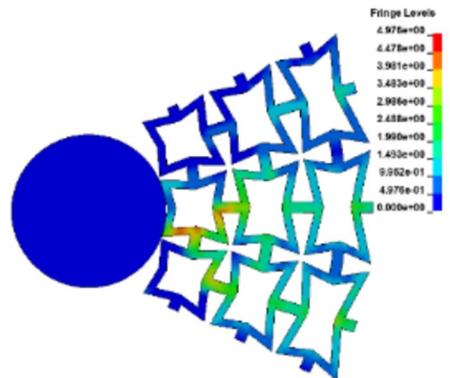
由图3可以看出,负泊松比结构的能量吸收率和有效能量吸收率随着冲击速度的增加而增大.转子突然发生故障时,由于转速很高,冲击速度很大,这种负泊松比超材料的能量吸收率就会很高,因此可以高效地吸收转子动能,迅速减振,从而减小破坏.

若冲击速度较低时,随着冲击角度增加,材料的总能量吸收率有较为明显的增加.而由图4所示的应力云图可以看出,以 $\theta = 20^\circ$ 进行碰撞时,材料在接触时,会使得胞元在一定程度的斜向受到压缩,且应力场中出现多个极大值区域.结合 $v =$

5.0m/s 冲击速度下的曲线,可以看出,冲击角增大后,由于材料在斜方向上的刚度较低,更容易产生变形,从而导致更大的能量吸收.在 $v = 1.0\text{m/s}$ 与 5.0m/s 两种冲击速度下,冲击角为 $\theta = 20^\circ$ 时,有效吸能率相对 $\theta = 0^\circ$ 时分别增大 34.5% 和 48.6%.这说明,当冲击速度较大的时候,材料会发生更大的塑性变形,因此当冲击角增加至 40° 时,材料仍会发生一定的塑性变形,吸能率进一步增大.



(a) 0° 冲击接触时应力云图
(a) Stress diagram at 0° impact angle



(b) 20° 冲击接触时应力云图
(b) Stress diagram at 20° impact angle

图4 $v = 1.0\text{m/s}$ 下不同冲击角度时结构的应力分布
Fig.4 Stress distribution for different impact angles at $v = 1.0\text{m/s}$

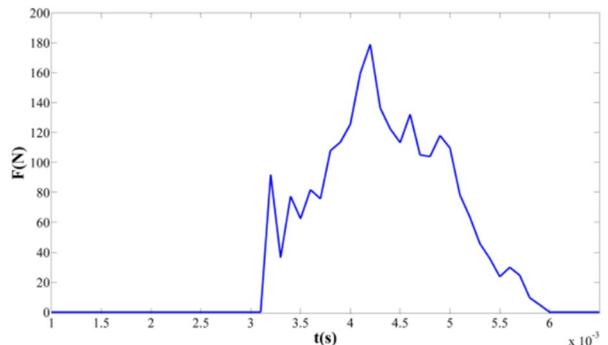


图5 10m/s 冲击下材料的反力-时间图
Fig.5 Reaction force-time diagram at 10m/s impact velocity

结合图5所示的材料结构边界反力随时间的

变化曲线,可以看到,在 $t = 0.0037s$ 时刻至材料到达最大压缩状态的 $t = 0.0042s$ 时刻之间,反力快速增大,材料进入到平台应力强化阶段.这说明此时冲击速度较大,而负泊松比超材料结构以塑性变形为主.

2 负泊松比结构减振实验验证

2.1 实验设计

为验证提出的负泊松比圆弧星形超材料结构对于转子的减振效果,在转子实验台上进行了验证实验.试验台以及部件说明如图 6 和表 4 所示.

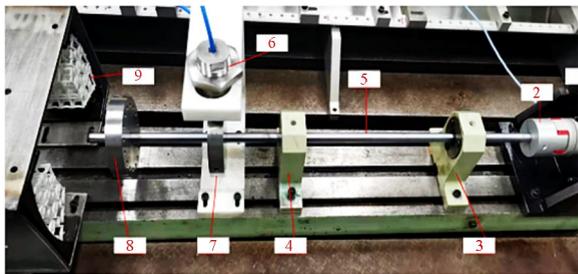


图 6 转子实验台
Fig.6 Setup overview

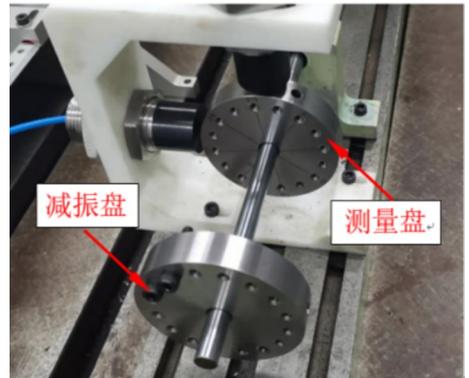
表 3 实验部件
Table 3 Setup components

编号	部件
1	电机
2	柔性联轴器
3	轴承 1
4	轴承 2
5	轴
6	电涡流位移传感器
7	盘 1(测量盘)
8	盘 2(减振盘)
9	负泊松比减振结构

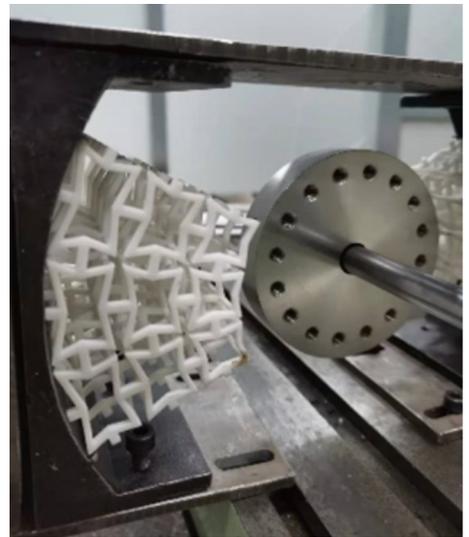
在盘 2(减振盘)上安装 2 个螺钉来模拟不平衡质量.在盘 1(测量盘)上安装位移传感器,用于测量位移.将两个量程为 20mm 的电涡流位移传感器分别安装在固定支架的垂直于水平方向,测量盘的 x 方向(横向)与 y 方向(纵向)位移,如图 7(a)所示.试验开始时,将安装负泊松比蜂窝材料 9 的支座平移至减振盘处并固定,如图 7(b)所示.

超材料结构采用聚酰胺 3D 打印制备, z 方向有 5 层胞单元,径向有 3 层尺寸渐变胞单元,如图 8

所示.当转子由于不平衡质量产生较大振动时,质量盘 2 会与结构接触.

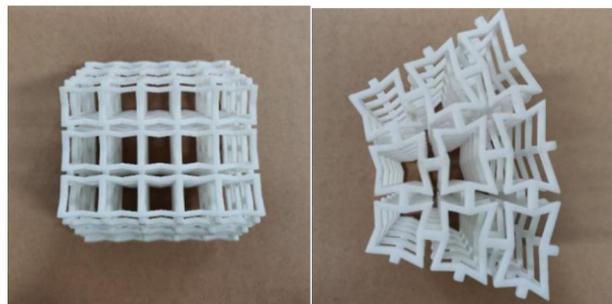


(a) 不平衡盘与测量盘
(a) Disks of rotor



(b) 减振结构安装位置
(b) Installing position of NPR structure

图 7 不平衡质量的施加与减振结构位置
Fig.7 Unbalanced mass and position of NPR structure



(a) 减振结构正面 (b) 减振结构侧面
(a) Front view of NPR structure (b) Side view of NPR structure

图 8 聚合物 3D 打印的减振结构
Fig.8 Polymer 3D printed NPR structure

2.2 实验结果分析

首先不放置负泊松比超材料减振结构,通过控制伺服电机,缓慢地将转子的转速提升.当转速提升至 1500rpm 后维持不变,观察转子振动波形,待

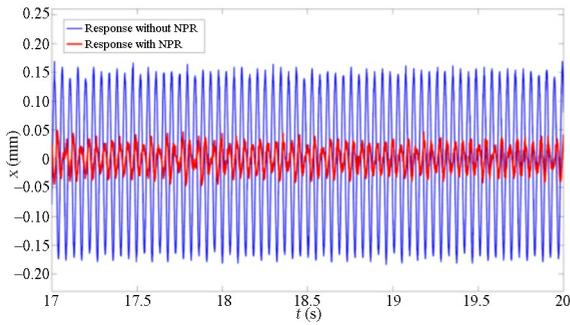
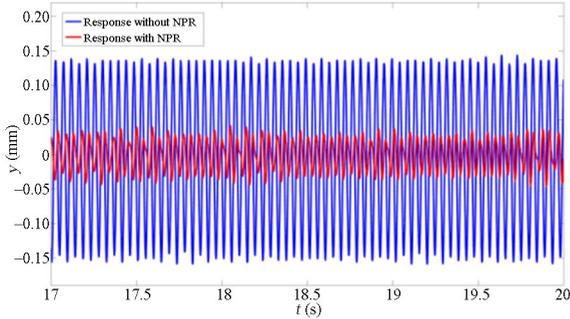
(a) x 方向位移时域图(a) Time-domain diagram of displacement in x direction(b) y 方向位移时域图(b) Time-domain diagram of displacement in y direction

图9 盘1质心位移时域

Fig.9 Disk 1 centroid displacement response

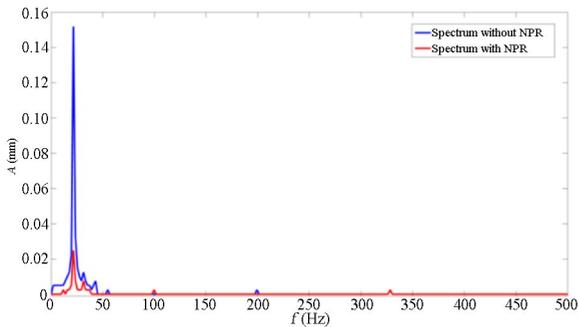
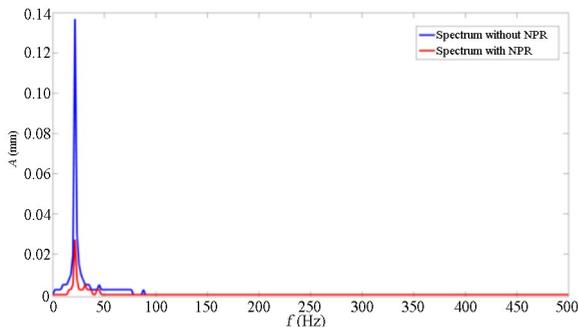
(a) x 方向振动频域图(a) Frequency-domain displacement in x direction(b) y 方向振动频域图(b) Frequency-domain displacement in y direction

图10 质量盘1质心位移频域图

Fig.10 Spectra of displacements in x and y directions

复前一实验的过程,转盘与减振结构接触后,采集20s数据;分析数据,结果如图9与图10所示。

由图9的测量盘质心位移可以看出,负泊松比超减振结构作用下,转子的振幅有明显降低,最大振幅在 x 、 y 方向上分别减少了65.2%和61.8%。由于实验中仅在盘的 x 方向安装了减振结构,因此在 x 方向减振效果更明显;此外,通过图10所示的频谱可以看出,碰撞前后协调响应频率位置基本一致,证明了负泊松比结构在减振时对转子的转速影响很小,即减振结构与转子间不会产生很大的摩擦力。在实际的旋转机械中,往往需要在减振时保持转速,因此这是负泊松比减振结构一个优势。

3 结论

本文针对航空发动机转子系统,提出了一种负泊松比圆弧蜂窝超材料结减振结构,建立了非对称星形胞单元模型,分析了转子与超材料结构碰撞的动能吸收率与参数的关系。在转子实验台进行了负泊松比超材料减振结构的验证实验。主要研究结果如下:

1)负泊松比结构的能量吸收效率随着冲击速度的增加会明显升高,因此对于高速转子有很好的减振吸能效果;

2)在一定范围内,随着冲击角度的增大,负泊松比超材料结构的能量吸收率会增加。但当冲击角度过大时,由于径向冲击速度较小,会导致能量吸收率降低;

3)加工了负泊松比超材料转子减振结构,并进行了实验验证。结果证明了负泊松比减振结构的有效性。对于转子不平衡故障,转子的振幅可以减少63.5%。而且负泊松比减振时转子的转速基本不变。

参考文献

- [1] HAN S, LU G, XIANG X. Energy absorption of a bio-inspired honeycomb sandwich panel [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(8):6286-6300.
- [2] ZHOU J, QIN R, CHEN B. Energy absorption properties of multi-cell thin-walled tubes with a double surface gradient [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 145: 106386.
- [3] YIN S, WANG H, HU J, et al. Fabrication and anti-crushing performance of hollow honeytubes [J].

振动进入稳态后采集位移数据,时长为20s;然后通过位移分析,找到振幅的波峰平均值以确保安装负泊松比减振材料时,减振结构与转盘的间隙小于振幅,使得负泊松比结构与转子产生接触。然后重

- Composites Part B: Engineering, 2019, 179: 107522.
- [4] 朱绍涛, 李静, 张伟. 负泊松比蜂窝夹层板的多周期运动研究[J]. 动力学与控制学报, 2021, 19(5): 33-38.
- ZHU S T, LI J, ZHANG W. Multiple periodic motions of a honeycomb sandwich plate with negative poisson's ratio [J]. Journal of Dynamics and Control, 2021, 19(5): 33-38. (in Chinese)
- [5] 张新春, 刘颖, 李娜. 具有负泊松比效应蜂窝材料的内面冲击动力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(5): 475-482.
- ZHANG X C, LIU Y, LI N. In-plane dynamic crushing of honeycombs with negative poisson's ratio effect [J]. Explosion And Shock Waves, 2012, 32(5): 475-482. (in Chinese)
- [6] 崔世堂, 王波, 张科. 负泊松比蜂窝面内动态压缩行为与吸能特性的研究[J]. 应用力学, 2017, 34(5): 919-924.
- [7] MENG J, DENG Z, ZHANG K, et al. Band gap analysis of star-shaped honeycombs with varied Poisson's ratio [J]. Smart Materials & Structures, 2015, 24: 095011.
- [8] 熊飞扬, 高松林, 李晓彬, 等. 局部冲击载荷作用下星形蜂窝夹心梁的动态响应研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 44(2): 388-392.
- XIONG F Y, GAO S L, LI X B, et al. Study on dynamic response of star Honeycomb sandwich beam under local impact load [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2020, 44(2): 388-392. (in Chinese)
- [9] AI L, GAO X L. An analytical model for star-shaped re-entrant lattice structures with the orthotropic symmetry and negative Poisson's ratios [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 145: 158-170.
- [10] ALOMARAH A, MASOOD S H, RUAN D. Out-of-plane and in-plane compression of additively manufactured auxetic structures [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106107.
- [11] BALAWI S, ABOT J L. A refined model for the effective in-plane elastic moduli of hexagonal honeycombs [J]. Composite Structures, 2008, 84(2): 147-158.
- [12] 富展展, 尹佑旺, 孙秀婷. 基于弹性关节的二维宽频隔振结构的设计及优化[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(2): 29-34.
- FU Z Z, YIN Y W, SUN X T. Design and optimization of broadband vibration isolation structure with elastic joints [J]. Journal of Dynamics and Control, 2020, 18(2): 29-34. (in Chinese)
- [13] GAO Q, LIAO W, WANG L. On the low-velocity impact responses of auxetic double arrowed honeycomb [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 98: 105698.
- [14] GUO M F, YANG H, MA L. Design and characterization of 3D AuxHex lattice structures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 181: 105700.
- [15] FU M H, CHEN Y, HU L L. Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs [J]. Composite Structures, 2017, 175: 101-110.
- [16] QI C, JIANG F, REMENNIKOV A, et al. Quasi-static crushing behavior of novel re-entrant circular auxetic honeycombs [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 197: 108117.
- [17] SU Y, WU X, SHI J. A novel 3D printable multi-material auxetic metamaterial with reinforced structure: improved stiffness and retained auxetic behavior [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2020, 29(3): 408-418.
- [18] 尹冠生, 姚兆楠. 梯度负泊松比蜂窝材料的冲击动力学性能分析[J]. 动力学与控制学报, 2017, 15(1): 52-58.
- YIN G S, YAO Z N. Dynamic crushing performance for graded auxetic honeycombs with negative poisson's ratio [J]. Journal of Dynamics and Control, 2017, 15(1): 52-58. (in Chinese)
- [19] YANG H, WANG B, MA L. Mechanical properties of 3D double-U auxetic structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2019, 180-181: 13-29.
- [20] WEI L, ZHAO X, YU Q, et al. A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 149: 106623.
- [21] WANG H, LU Z, YANG Z, et al. In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress regions [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 151: 746-759.