

变截面多稳态梁结构减振吸能分析与优化设计

刘姣姣¹, 付莉莉², 高超², 张晓鹏^{*1}, 罗阳军³

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024;

2. 西安航天动力研究所, 西安 710199; 3. 哈尔滨工业大学(深圳)理学院, 深圳 518055)

摘要:基于多稳态梁结构具有吸能且可重复使用的特点,本文研究包含变截面多稳态梁的单胞结构及其周期性排布的减振吸能效应及其优化设计方法。对多稳态结构进行考虑几何非线性的位移加载/卸载有限元仿真,根据其载荷-位移曲线分析多稳态结构的减振吸能原理,并研究串联与并联周期性排布形式对结构整体吸能特性的影响规律。研究基于多参数调控的变截面梁结构形状表征方法,根据多稳态结构储能特点建立变截面多稳态单胞结构的结构优化模型,通过求解优化问题获得总质量不变条件下最优变截面梁结构形状。进一步地通过对优化结果的有限元分析验证优化的有效性,并对结构进行瞬态冲击荷载下响应分析,证明多稳态结构的冲击保护作用。

关键词:结构优化;多稳态梁结构;减振吸能;变截面梁

中图分类号:O224

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2023)02-0159-07

1 引言

吸能材料与结构由于具有人员与设备保护以及隔振与抗冲击性等特点,近年来受到人们的持续关注。常见吸能材料与结构的工作机理包括,(1)通过塑性变形吸能,如传统吸能蜂窝结构的吸能^[1]和陶瓷的破碎^[2]等;(2)利用材料粘弹性实现吸能^[3],如橡胶鞋底或汽车中的油活塞减震器利用粘弹性效应实现吸能。然而,基于塑性变形的吸能结构不能重复使用,而粘弹性材料与结构耗能却依赖于加载速率。为了获得可重复使用且与加载速率无关的吸能结构,一些新型吸能结构提出^[4]。其中,利用结构不稳定性来构造吸能结构的设计是一种可行的思路^[5]。

内嵌柔性梁的刚性结构在受到外加荷载时其柔性梁具有不稳定性,结构可能存在多个稳态构型从而锁住部分冲击能量。对于内嵌柔性梁的双稳态结构,当受到外界扰动达到临界值时,结构会瞬间从一个稳定的状态变形到另一个稳定的状态,这个过程称为弹性屈曲跳跃(snap-through),在此过程中结构整体会出现非线性大变形,但是结构内部组成材料依然处在弹性变形范围内。这一双稳态(或多稳态)特性,可在多个工程领域具有应用价值,如微生物取样胶囊^[6]、用于空间应用的电缆切

割机构^[7]、在低频域实现高带宽的能量采集器^[8,9]、避免传感器故障的阈值冲击传感器^[10]以及具有可编程多稳态特性的机械超材料^[11]等。使用双稳态柔性(多稳态)结构构成的多稳态机械超材料由于结构整体出现非线性大变形和结构内部发生弹性变形而可以实现弹性可重复使用耗能。

近年来,多稳态机械超材料结构的机理研究与设计受到广泛关注。Qiu等^[12]基于模态叠加和能量最小化原则推导了单个余弦梁结构在位移作用下的力-位移关系的理论值,Ha等^[13]采用增材制造等方法构建柔性梁杆结构机械超材料,并通过实验和数值分析研究了多稳态机械超材料的力学特性;姜伟红^[14]分析设计了悬臂梁翘曲双稳态结构;Restrepo等^[15]通过相位转变来分析双稳态材料的变形特性;Fraternali等^[16]建立多尺度质量弹簧模型来推导序列双稳态结构的解析解;Ren等^[17]利用两种形状记忆合金材料组合的双稳态结构实现可人工调控带隙;赵剑等^[18]通过实验进行了柔性双稳态结构分岔跳跃模式的探讨。

为获得更好的吸能效果,提出不同的多稳态结构优化设计方法。赵剑等^[19]将余弦梁分段加强优化设计来实现可调控的双稳态机制;吴佳穗^[20]基于遗传算法对曲壳结构进行优化设计使其呈现多稳态吸能特性;Deng等^[21]基于拓扑优化方法来实现在承载力峰值差最大化的多稳态梁结构优化设计。然而在多稳态结构优化中,因其具有突变性和多局部解特性,所得的优化设计可能会包含复杂不规则

收稿日期:2021-11-22;修改稿收到日期:2022-06-20.

基金项目:国家自然科学基金(11972104)资助项目.

作者简介:张晓鹏*(1985-),男,博士,副教授

(E-mail:zhangxiaopeng@dlut.edu.cn).

结构或构型突变等非理想结构。本文针对这一问题,采用以多个平滑构型为基础叠加构造具有光滑构型的变截面梁结构,并利用多参数优化来获得抗冲击性能良好的多稳态变截面梁结构。

本文研究了以多个平滑结构为基础的多参数双稳态吸能结构的优化设计方法。首先对余弦梁结构单胞参数化建模,并进一步构造 3×4 周期排列多稳态结构,通过提取载荷-位移曲线来分析余弦梁多稳态结构逐层失稳的吸能特点和其他相关力学特征。本文在研究多稳态结构吸能特点的基础上,引入多参数化建模实现双稳态单胞优化构型的构建,并对其进行多参数优化分析。通过对优化前后的位移加载结果的分析与比较,验证了周期性排列优化结构吸能效果的提升,并通过瞬态冲击分析验证了多稳态结构的保护作用。

2 计算模型

2.1 多稳态结构有限元模型及吸能特性分析

常见的内嵌柔性梁的多稳态结构基础构型主要包括直梁结构^[13]和余弦梁结构^[15],本文选用余弦梁构型作为计算分析的基础验证构型。

2.1.1 模型构建

多稳态材料结构可由多个包含双稳态特性的部件(如曲梁)的单胞结构组装而成,图 1(a)为由单胞组成的多稳态结构模型,其中任意一个单胞为如图 1(b)所示的双稳态余弦梁结构单胞,单胞由双稳态余弦梁和支撑刚壁组成。余弦梁的基础厚度 t 、余弦梁的高度 h 以及余弦梁结构的跨度 L 将作为多稳态结构分析与优化的主要设计参数。核心受压余弦型梁元件构型的基本表达式为

$$y = \frac{h}{2} \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{x}{L}\right) \right] \quad (1)$$

式中 x 为如图 1(b)所示的余弦梁结构到左支撑壁的距离, y 为余弦线到 x 轴的距离。

本文结构采用材料为尼龙,其基本材料属性为 $E=1 \text{ GPa}$, $\nu=0.4$, $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ 。

2.1.2 内嵌柔性梁多稳态结构吸能机理分析

基于 Abaqus 软件平台对 2.1.1 节提出的内嵌余弦梁单胞结构(几何尺寸为 $t=0.72 \text{ mm}$, $h=5.04 \text{ mm}$, $L=40 \text{ mm}$)和 3×4 单胞阵列结构进行静力学分析,其中单元选择平面应变单元,边界条件如图 1(a)所示。对于单一余弦梁单胞及阵列结构,进行如图 1(a)所示的竖直向下的位移加载与卸载所得的载荷-位移曲线如图 2 所示。单胞结构的加载与卸载变形过程经历了三个阶段(图 3),第

一阶段,初始构型在荷载达到临界值之后结构发生屈曲并快速变形;第二阶段,继续加载结构变形达

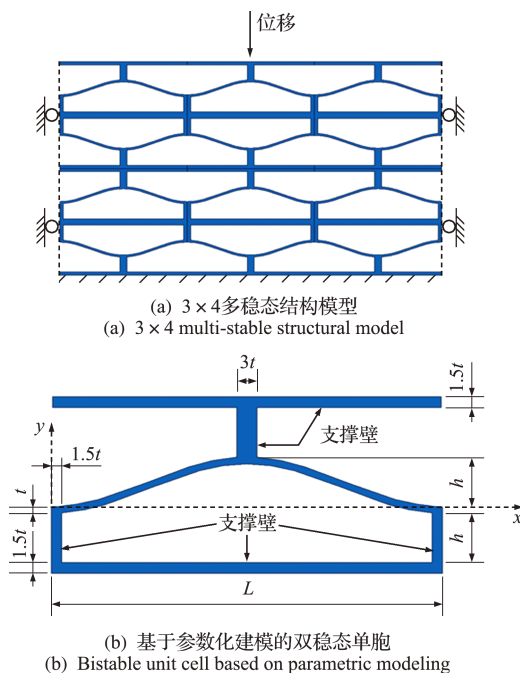
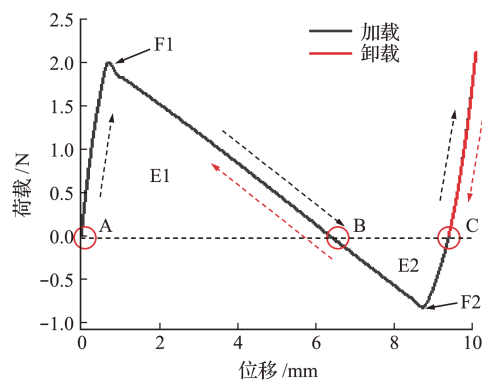
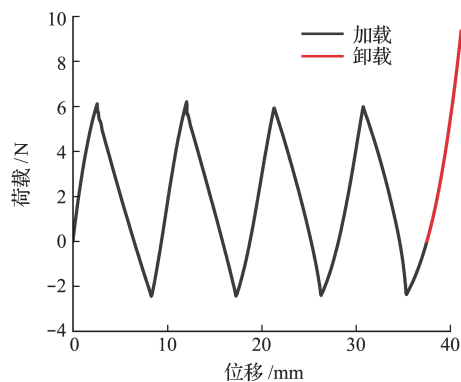


图 1 多稳态结构整体与双稳态单胞模型
Fig. 1 Global model of multi-stable structure and bistable single cell model



(a) 双稳态单胞结构的荷载-位移曲线
(a) Load-displacement curve of bistable unit cell



(b) 3×4 多稳态结构的荷载-位移曲线
(b) Load-displacement curve of 3×4 multi-stable structure

图 2 余弦梁单胞与 3×4 多稳态结构的荷载-位移曲线
Fig. 2 Load-displacement curves of cosine beam cells and 3×4 multi-stable structures

到另一个稳态;第三阶段,卸载后变形结构稳定在第二稳态。综合荷载-位移曲线和单胞变形过程,可观察到结构在卸载后由于负反力的存在,结构无法恢复到初始状态(停留在图3的状态4处,即荷载-位移曲线的点C处),从而将能量锁在结构中达到吸能或抗冲击的效果。进而从 3×4 排列的余弦梁结构的荷载-位移曲线关系(图2(b))可以看出,周期性结构在加载时,由于网格划分不均匀等微小缺陷的存在,各层之间是逐层发生屈曲变形的,因而呈现多个稳态的现象。其荷载峰值个数(荷载极大极小值)为纵向排布层数的倍数(4倍),极限峰值大小为横向单胞个数的倍数(3倍)。结构在卸载后依然能保持稳定构型,用于多稳态结构的每个单胞承受的载荷极限峰值与单个单胞峰值基本一样,从而多稳态结构储存的能量与单个双稳态单胞储存能量线性相关。

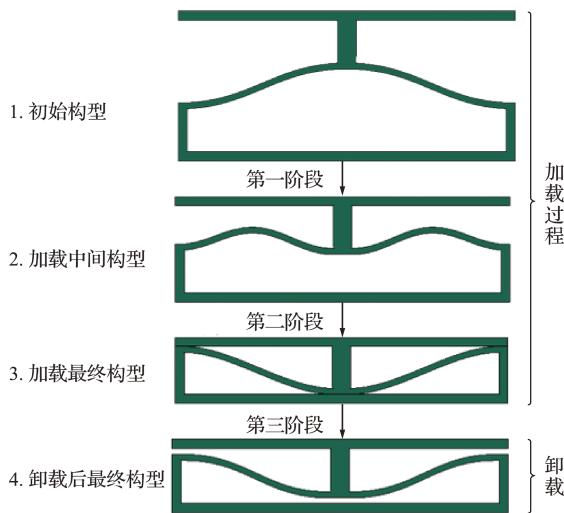


图3 单胞加卸载变形过程

Fig. 3 Loading and unloading deformation process of a unit cell

2.2 变截面多稳态梁优化模型

根据周期性排布多稳态结构储能与单胞结构储能线性相关的特点,在优化时只需取单一余弦梁单胞为研究对象来研究多稳态结构的储能效应即可,且影响双稳态结构储能能力的主要部件为余弦梁部分,不包含对结构起支撑作用的刚壁部分,因此优化问题只考虑变截面余弦型梁的优化设计。

2.2.1 基于多参数调控的变截面梁结构形状表征

为获得更好的吸能效果,本文采用多构型叠加的策略构建多稳态梁结构,并对其进行多参数化优化设计。

对于等截面梁结构,引入厚度表达式 $t_i(x) = t + \alpha_i t \cos(2i\pi x/L)$ ($i = 1, 2, \dots, k$), 通过改变 i 值和 α_i 可以获得如图4所示的不同形状的变截面

梁。且由于 $\int_0^L t_i(x) dx = t$, 从而保证了单一梁结构的总体积不变。

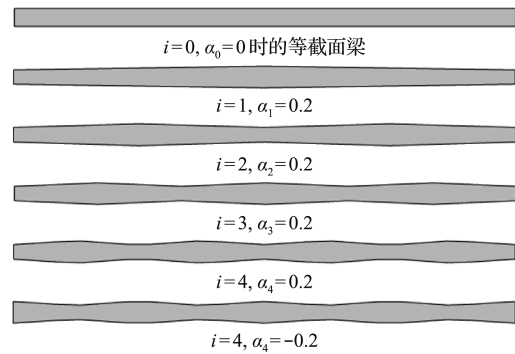


图4 通过多参数控制得到不同形状的变截面梁

Fig. 4 Variable cross-section beams of different shapes obtained through multi-parameter control

通过将些变截面梁构型叠加可以获得更加多样化的变截面梁构型,叠加后的厚度表达式如式(2)所示,其变截面构型主要由基础变截面梁个数 k 与变厚度系数 $\{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k\}$ 和 $\{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k\}$ 决定。

$$t(x) = \sum_{i=0}^k \beta_i [t_i(x)] / \sum_{i=0}^k \beta_i \quad (2)$$

式中 k 为基础梁构型的数目, α_i 为决定第 i 个基础构型形状的系数, β_i 为第 i 个基础梁构型的叠加系数。如果选取 k 为基础梁构型的数目,则优化问题的变量总数为 $2(k+1)$ 。本文算例取 $k=4$ 。

2.2.2 优化模型

以单位体积的多稳态结构吸收(锁住)冲击荷载带来的机械能最大化为优化目标,在多参数设计变量的调控下,变截面梁构型与等截面梁总体积不变,因此取目标函数为变截面梁结构储存的机械能最大化。双稳态结构单胞的储能大小为 $E = E_1 - E_2$, 其中 E_1 和 E_2 分别为图2(a)的A和B之间与B和C之间荷载关于位移 x 的积分,其表达式分别为 $E_1 = \int_{x_A}^{x_B} F dx$ 和 $E_2 = \int_{x_B}^{x_C} |F| dx$ 。内嵌柔性梁的双稳态梁结构的储能特性主要与两个荷载极值点有关,荷载极大值点 F_1 为结构发生阶跃变形所需要的临界荷载,而荷载极小值点 F_2 为判断结构是否具有双稳态的关键。

为了保证设计的构型具有多稳态特性,需要提出最小极值点约束,本文选取了荷载极大值和极小值的比例约束 $|F_2/F_1| \geq \bar{\eta}$ 作为约束,即在保证 F_2 为负值的前提下,要求其最大临界载荷值满足一定的比例关系,这一数值在算例中取为 $\bar{\eta} = 0.05$ 。

基于上述优化目标和约束,变截面多稳态梁优

化可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{Find} \begin{cases} a_m = \{\alpha_0, \dots, \alpha_k\} \\ b_m = \{\alpha_0, \dots, \alpha_k\} \end{cases} \\ & \max E_m = E_1(a_m, b_m) - E_2(a_m, b_m) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \eta_{cr} = |F_2/F_1| \geq \bar{\eta} \\ -0.3 \leq \alpha_i \leq 0.3 \quad (n=1, 2, \dots, k) \\ 10^{-3} \leq \beta_i \leq 1.0 \quad (n=0, 1, \dots, k) \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

式中 α_i 为第 i 个基础构型的系数, 为了基础几何构型能够存在, α_i 的值须处于 $(-0.5, 0.5)$, 本优化令 $\alpha_i (n=1, 2, \dots, k)$ 在 $[-0.3, 0.3]$ 取值, β_j 为每种基础构型的叠加系数, 为了计算方便, β_j 在 $[10^{-3}, 1]$ 取值。 $E_m(a_m, b_m)$ 为设计变量为 a_m 和 b_m 时结构储存能量的大小。本文对单个多稳态单胞进行优化后, 进一步将其拼装为具有多个多稳态单胞的结构, 需要注意的是, 其中图 1(a) 中有部分单胞是与图 1(b) 方向相反的, 需要按照单胞底面进行镜像阵列后再进行拼装。

对上述优化问题, 本文采用多岛遗传算法 (Multi-Island-GA)^[22] 进行求解。多岛遗传算法是建立在传统遗传算法的基础上, 将每个种群的个体分为若干个岛 (子群), 每个岛里的个体可进行选择、交叉、变异, 子群中优秀个体可以定期选择在不同子群间迁移, 继续进行传统遗传算法的操作。演变过程中的两个主要参数为迁移间隔和迁移率。其具有比传统遗传算法更优良的全局求解能力和计算效率。

3 结果与讨论

3.1 优化设计

3.1.1 内嵌柔性梁的多稳态单胞结构优化设计

选取 $t=0.72 \text{ mm}$ 的等截面余弦梁结构为初始结构, 引入 4 种变截面基础构型 (即 $k=4$), 优化设计变量数为 10。经计算, 初始等截面梁结构的目标函数值为 $5.12 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。为了保持单胞结构的双稳态现象稳定存在 (即 F_2 的值为负且不会趋近于 0), 设定 $\bar{\eta}=0.05$ 。采用多岛遗传算法对优化问题求解, 将变截面余弦型梁部分的 320 个平面应变单元作为设计域, 基础构型系数与各个构型的叠加系数作为设计变量来进行优化设计分析。在优化时, 初始种群个体为 10, 将整个优化设计群体分为 10 个岛 (子群), 进化代数为 10, 交叉率为 1, 岛间迁移率为 0.01, 变异率为 0.01, 迁移间隔为 5。优化共进行了 1001 步, 在第 893 步得到了最优解, 最优解求得的目标函数值为 $6.04 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 较初始

结构储存能量值增加了 18%。最优解与初始解对比列入表 1, 优化后的 4 种变截面基础构型如图 6 所示, 由等截面构型和这 4 种变截面基础构型叠加后得到的优化几何构型如图 5 所示。

表 1 初始设计变量与优化设计变量
Tab. 1 Initial design variables and optimized design variables

解的类型	参数类型	值/mm
初始解	a	$\{0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0\}$
	b	$\{1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0\}$
最优解	a	$\{0.0, 0.004, -0.296, -0.196, 0.286\}$
	b	$\{0.503, 0.374, 0.944, 0.047, 0.344\}$

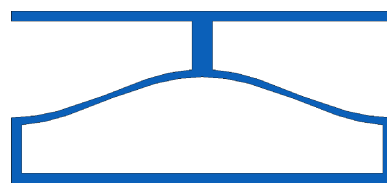


图 5 优化后 4 种变截面基础构型
Fig. 5 Four basic configurations of variable cross-section which are optimized

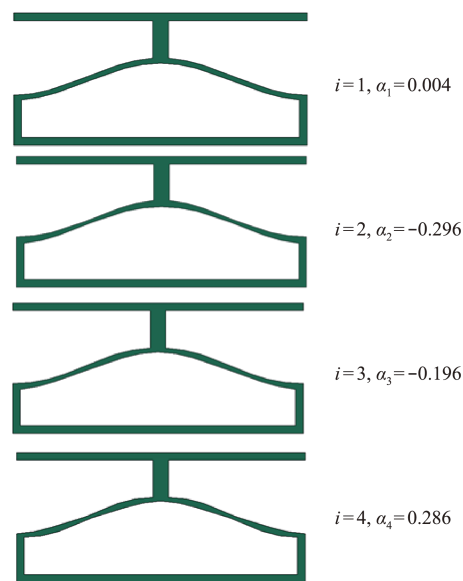


图 6 变截面单胞构型
Fig. 6 Variable cross-section unit cell configuration

3.1.2 单胞结构吸能特性分析

为验证所得优化设计的性能, 本研究对优化设计进行位移加载数值仿真实验, 得出其荷载-位移曲线。优化设计与初始等截面梁构型的荷载-位移曲线对比如图 7 所示, 初始构型与优化构型的主要力学性能参数列入表 2。单胞结构在发生屈曲后, 可以通过施加反方向的力或位移载荷使其恢复原状, 因此可在一定条件下实现多稳态屈曲结构的可重复使用。

表2 等变截面相关力学性能参数比较

Tab. 2 Comparison of correlation results between constant cross-section and variable cross section

截面 类型	F_1 /N	F_2 /N	E_1 /N·mm	E_2 /N·mm	力比值 绝对值 /N	存储能 量 E /N·mm
等截面梁	1.98	-0.82	6.43	1.31	0.41	5.12
优化变截面梁	1.92	-0.49	6.67	0.63	0.25	6.04
变化比例/%	3.1 (↓)	40.25 (↑)	3.7 (↑)	52.9 (↓)	39.1 (↓)	18.0 (↑)

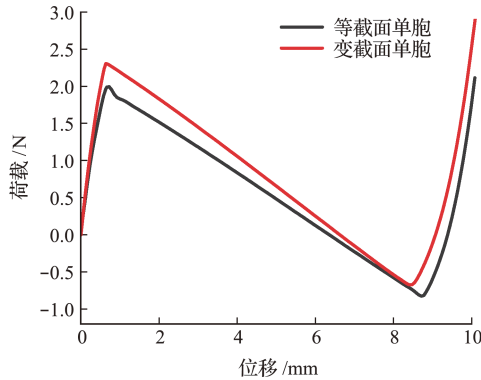


图7 等变截面单胞结构的荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of load displacement curves of uniform and variable cross-section unit cell structures

3.2 周期性排布多稳态梁结构吸能与冲击保护分析

通过上述优化变截面单胞进行 3×4 的周期性阵列,并采用有限元方法对其进行方向为竖直向下的位移加载分析,得到的荷载-位移曲线与初始等截面结构对比如图8所示。从图8可以看出,变截面梁结构串并联之后依然符合周期性结构变形和储能的特点,变截面梁周期性排布的荷载极小值比等截面梁结构大,加载过程中,变截面多稳态梁阵列结构的荷载极大值 5.84 N 与等截面梁单胞结构 5.42 N 十分接近。经计算,优化后的 3×4 多稳态变截面梁阵列结构储存的能量值为 73.01 N·mm,而初始等截面梁阵列结构储存能量值为 62.44 N·mm,优化后的变截面多稳态梁阵列结构储能值相对等截面梁阵列结构增加了 16.9%,与单一变截面梁单胞优化后提升比例相近。

本文采用显示动力学分析物体从相同高度跌落过程中不同时间段的物块加速度来验证优化的冲击保护的碰撞与冲击保护的能力。选取三种 3×4 阵列结构进行冲击仿真分析比较实验,(1) 未变形的等截面多稳态结构上进行冲击分析;(2) 未变形的优化变截面多稳态结构上进行冲击分析;(3) 在其致密状态下的相同等截面多稳态结构上进行冲击分析(即多稳态结构的压紧模型,结构面外厚度 b 为 100 mm),如图9所示。

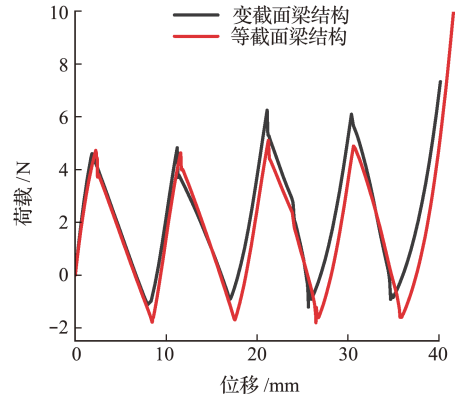
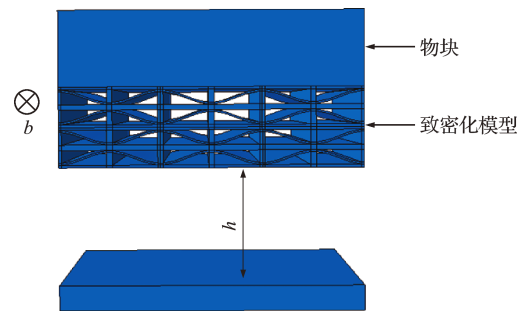
图8 3×4 等变截面多稳态阵列结构的荷载-位移曲线的对比
Fig. 8 Comparison of load displacement curves of uniform and variable cross-section 3×4 multi-stable structures

图9 致密化结构冲击

Fig. 9 Impact diagram of densified structure

三种模型在同等条件下与 2.7 kg 的冲击物块从 $h = 100$ mm 的高度坠落时,提取物块的加速度随时间变化的曲线如图10所示。可以看出,未变形的多稳态结构的峰值加速度远小于致密化结构的加速度峰值,从而验证了多稳态结构可以增强物体的防冲击能力。且优化后的变截面多稳态梁结构的峰值加速度相对等截面梁阵列结构降低了 9.07%,从而证明优化结构有更好的防冲击效果。与准静态加载不同的是,在瞬态冲击过程中,冲击力向下传播,在各层单胞相同的情况下将引发上层

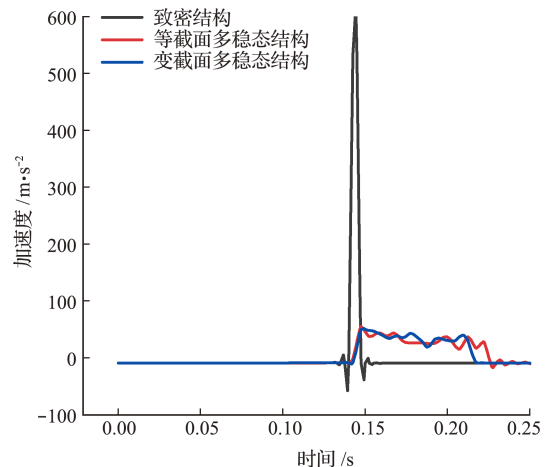


图10 三种结构的加速度-时间曲线对比

Fig. 10 Comparison of acceleration-time curves of two structures

单胞先发生屈曲,若冲击载荷足够大,将逐层引发下层单胞的屈曲,因此在考虑瞬态作用的多稳态结构吸能设计时也应考虑不同瞬态载荷的影响。

4 结 论

(1) 通过对多稳态余弦梁单胞结构和周期性排布多稳态结构的有限元分析,研究了多稳态材料变形和吸能特点。验证了多稳态结构具有储能特性和周期性排布时能量存储与单胞储能线性相关的变化规律。

(2) 建立基于多参数调控的变截面梁结构几何描述及优化模型,并对单个和周期性排布等截面和变截面多稳态结构进行优化,分析比较变截面多稳态梁结构吸能特性的提升效果,给出质量不变条件下以结构吸能效率为目标的优化设计构型。

(3) 对多稳态梁结构变形前结构进行瞬态冲击分析,证明双稳态结构对物体冲击具有保护作用。

(4) 本文模型考虑的是理想变形状态,但实际过程中可能出现表面压力不均匀等偏载情况,此时表层单胞可能发生扭转,将一定程度影响结构的吸能效果,但是也可以产生新的功能与应用^[23]。对于多层单胞结构,下层单胞由于结构载荷的传递基本可以保持均匀受载,因此本方法对多层结构仍然适用且仍能保持稳定。

参考文献(References):

- [1] Hayes A M, Wang A J, Dempsey B M, et al. Mechanics of linear cellular alloys[J]. *Mechanics of Materials*, 2004, **36**(8): 691-713.
- [2] Hua J, Lei H S, Gao C F, et al. Parameters analysis and optimization of a typical multistable mechanical metamaterial[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, **35**: 100640.
- [3] Dawson M A, McKinley G H, Gibson L J. The dynamic compressive response of open-cell foam impregnated with a Newtonian fluid [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2008, **75**(4): 1.
- [4] Bertoldi K, Reis P M, Willshaw S, et al. Negative poisson's ratio behavior induced by an elastic instability[J]. *Advanced Materials*, 2010, **22**(3): 361-366.
- [5] Florijn B, Coulaïs C, van Hecke M. Programmable mechanical metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2014, **113**(17): 175503.
- [6] Salem M B, Aiche G, Rubbert L, et al. Design of a microbiota sampling capsule using 3D-printed bistable mechanism [A]. 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society(EMBC)[C]. 2018.
- [7] Zirbel S A, Tolman K A, Trease B P, et al. Bistable mechanisms for space applications [J]. *PLoS One*, 2016, **11**(12): 1-18.
- [8] Zhang X T, Tian X L, Xiao L F, et al. Application of an adaptive bistable power capture mechanism to a point absorber wave energy converter [J]. *Applied Energy*, 2018, **228**(3): 450-467.
- [9] Vysotskyi B, Parrain F, Aubry D, et al. Innovative energy harvester design using bistable mechanism with compensational springs in gravity field [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, **773**: 012064.
- [10] Frangi A, De Masi B, Confalonieri F, et al. Threshold shock sensor based on a bistable mechanism: Design, modeling, and measurements [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, **24**(6): 2019-2026.
- [11] Shan S C, Kang S H, Raney J R, et al. Multistable architected materials for trapping elastic strain energy [J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(29): 4296-4301.
- [12] Qiu J, Lang J H, Slocum A H. A curved-beam bistable mechanism [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, **13**(2): 137-146.
- [13] Ha C S, Lakes R S, Plesha M E. Design, fabrication, and analysis of lattice exhibiting energy absorption via snap-through behavior [J]. *Materials & Design*, 2018, **141**: 426-437.
- [14] 姜伟红. 基于悬臂梁翘曲的双稳态结构设计与分析 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018. (JIANG Wei-hong. Design and Analysis of Bistable Structures Based on Warped Cantilever Beams [D]. Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese))
- [15] Restrepo D, Mankame N D, Zavattieri P D. Phase transforming cellular materials [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2015, **4**: 52-60.
- [16] Fraternali F, Blesgen T, Amendola A, et al. Multiscale mass-spring models of carbon nanotube foams [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2011, **59**(1): 89-102.
- [17] Ren Z W, Ji L T, Tao R, et al. SMP-based multi-stable mechanical metamaterials: From bandgap tuning to wave logic gates [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, **42**: 101077.
- [18] 赵 剑, 程 凯, 高仁璟, 等. 柔性双稳态结构分岔跳跃模式的探讨 [J]. 机械工程学报, 2019, **55**(5): 74-81. (ZHAO Jian, CHENG Kai, GAO Ren-jing, et al. Snap-through bifurcation analysis of compliant bistable structures [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, **55**(5): 74-81. (in Chinese))

- [19] 赵 剑,魏 岩,高仁璟,等.基于局部截面构型优化的双稳态结构跳跃阈值控制与设计[J].机械工程学报,2016,**52**(19):154-161.(ZHAO Jian,WEI Yan,GAO Ren-jing,et al.Control of the snap-through characteristic through local cross-section optimization[J].*Journal of Mechanical Engineering*,2016,**52**(19):154-161.(in Chinese))
- [20] 吴佳穗.多稳态吸能结构设计及特性研究[D].华中科技大学,2019.(WU Jia-sui.Design and Characteristic study of Multi-Stable Energy Absorption Structure[D].Huazhong University of Science and Technology,2019.(in Chinese))
- [21] Deng H,Cheng L,Liang X,et al.Topology optimization for energy dissipation design of lattice structures through snap-through behavior[J].*Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*,2020,**358**:112641.
- [22] 赖宇阳.Isight参数优化理论与实例详解[M].北京:北京航空航天大学出版社,2012.(LAI Yu-yang.*Isight Parameter Optimization Theory and Case Study*[M].Beijing:Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press,2012.(in Chinese))
- [23] Zhang Y,Tichem M,van Keulen F.Rotational snap-through behavior of multi-stable beam-type meta-structures[J].*International Journal of Mechanical Sciences*,2021,**193**:106172.

Impact energy absorption analysis and design optimization of variable cross-section beam multi-stable structures

LIU Jiao-jiao¹, FU Li-li², GAO Chao², ZHANG Xiao-peng^{*1}, LUO Yang-jun³

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,

Dalian University of Technology,Dalian 116024,China;

2. Xi'an Aerospace Power Research Institute,Xi'an 710199,China;

3. School of Science,Harbin Institute of Technology,Shenzhen 518055,China)

Abstract: This paper studies the impact absorption effects and design optimization of variable cross-section multi-stable beam-based structures. The loading/unloading simulation of the large deformed multi-stable structure is performed with the finite element analysis to analyze the principle of vibration reduction and energy absorption of multi-stable structures. The influences of the periodic arrangement in series and parallel on the overall energy absorption characteristics of the structure are also studied. The multi-parameters-based shape characterization method of the beams with variable cross-sections is proposed. According to the characteristics of the energy storage of the multi-stable structure, the optimization model for the variable cross-section multi-stable beam structure is established. The optimal variable cross-section beam shape with the total mass constant is obtained by solving the optimization problem. Furthermore,the effectiveness of the optimization is verified by the finite element analysis of the optimization results,and the dynamic response analysis of the structure under the transient impact load proves the impact protection effect of the multi-stable structure.

Key words: structural optimization; multi-stable beam structure; vibration reduction and energy absorption; beam with variable cross section

引用本文/Cite this paper:

刘姣姣,付莉莉,高 超,等.变截面多稳态梁结构减振吸能分析与优化设计[J].计算力学学报,2023,**40**(2):159-165.

LIU Jiao-jiao,FU Li-li,GAO Chao,et al. Impact energy absorption analysis and design optimization of variable cross-section beam multi-stable structures[J].*Chinese Journal of Computational Mechanics*,2023,**40**(2):159-165.