

引文格式:吴小蕙,王彦峰,纪少锋,等. 新型浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器设计与力学性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(2): 39-47.

WU Xiaohui, WANG Yanfeng, JI Shaofeng, et al. Design and mechanical performance test of new type of floating counter pressure disc spring-stay cable shock absorber[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(2): 39-47.

DOI:10.19815/j.jace.2023.02010

新型浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器设计与力学性能试验

吴小蕙¹, 王彦峰¹, 纪少锋¹, 肖发平², 汪大洋²

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510080;

2. 广州大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:提出了一种新型浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器,其在拉压荷载作用下均处于受压工作状态,且初始刚度可调节;推导了减震器承载力、竖向刚度、变形能等参数的计算公式,建立了相关设计参数之间的量化关系;在此基础上设计加工了该新型减震器试件,在静态、动态荷载作用下开展了力学性能试验研究,通过与理论计算结果对比验证了减震器的合理性,揭示了减震器力学性能与加载频率、预压变形量、加载幅值之间的影响规律。结果表明:新型蝶形弹簧-拉索减震器可通过调节拉索长度、改变蝶形弹簧数量满足不同场合设计需求,试验结果与理论结果吻合良好,在设计变形量下的相对误差仅为3.82%;相同预压变形条件下,减震器等效刚度和等效阻尼比随加载频率增大而缓慢下降;相同加载频率下,等效刚度和等效阻尼比随预压变形量增大呈线性放大趋势,等效刚度的增幅为41.37%;相同加载频率、预压变形量条件下,增大加载幅值有助于提升减震器的耗能能力。

关键词:蝶形弹簧;拉索;减震器;性能试验;参数影响

中图分类号:TU352

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)02-0039-09

Design and mechanical performance test of new type of floating counter pressure disc spring-stay cable shock absorber

WU Xiaohui¹, WANG Yanfeng¹, JI Shaofeng, XIAO Faping², WANG Dayang²

(1. Power Grid Planning Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080,

Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University,

Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: A new type of floating counter pressure disc spring-stay cable shock absorber was proposed, which was in compression working state under tension and compression loading and the initial stiffness could be adjusted. The design formulas of bearing capacity, vertical stiffness, deformation energy and other parameters of the shock absorber were derived. The quantitative

收稿日期:2023-02-05

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(52178467);南方电网公司科技项目(037700KK52220039);

广州市教育局项目(202235058, 202102010459)

作者简介:吴小蕙(1974-),女,高级工程师, E-mail: 1175088580@qq.com。

通信作者:肖发平(1966-),男,高级工程师, E-mail: 93882469@qq.com。

relationship between relevant design parameters was established. On the basis, the new shock absorber was designed and processed, and the mechanical properties were tested under static and dynamic loading. The rationality of the proposed shock absorber was verified by comparing with the theoretical results. The influence of loading frequency, preloading deformation and loading amplitude on the mechanical properties of the shock absorber was revealed. The results show that the new type of shock absorber can meet the design requirements of different occasions by adjusting the length of the stay cable and changing the number of disc springs. The experimental results are in good agreement with the theoretical results, and the relative error under the design deformation is only 3.82%. Under the same preloading deformation, the equivalent stiffness and equivalent damping ratio of the shock absorber decrease slowly with the increase of the loading frequency. Under the same loading frequency, the equivalent stiffness and equivalent damping ratio have a linear amplification trend with the increase of preloading deformation, and the increase of equivalent stiffness is 41.37%. Under the same loading frequency and preloading deformation, increasing the loading amplitude will help to improve the energy consumption capacity of the shock absorber.

Key words: dis spring; stay cable; shock absorber; performance test; parameter influence

Author resumes: WU Xiaohui(1974-), female, senior engineer, E-mail: 1175088580@qq.com;

XIAO Faping(1966-), male, senior engineer, Email: 93882469@qq.com.

0 引言

长期以来,地震一直是工程结构损伤失效的主要灾源之一,结构设计在与地震侵袭作用的抗争中不断发展完善。然而,依靠结构自身能力(如强度、刚度等)抵御地震作用的传统抗震设计方法往往需要增大结构构件的截面尺寸,而构件截面的增加又将导致结构刚度和质量增加,进而使得吸收的地震力也随之增加,因此传统的结构抗震设计方法难以在经济性和技术可靠性上实现双赢。20 世纪下半叶,国内外专家开始将结构振动控制技术引入到土木工程结构中^[1],至此结构被动^[2]、主动^[3]、半主动控制^[4-5]设计取得了长足的进步,部分隔震、减震设计的工程结构,如玉树地震中的芦山县人民医院门诊综合楼等也经历了真实大地震的考验,取得了良好的抗震减灾效果^[6-9],在地震灾害侵袭下有效保障了建筑功能的可持续性。减隔震技术在建筑、桥梁、特种工程结构中已取得了较为广泛的应用,国内外专家学者也研发出了多种不同功能需求的技术装置,取得了丰硕的研究和应用成果^[10-13]。

近年来,蝶形弹簧因其具有中心自复位能力且能够方便应用于不同种类工程结构的振动控制中而受到众多学者的青睐^[14-15]。文献^[16]、^[17]研究了带预压组合蝶形弹簧耗能支撑的力学行为和失效机制,结果表明蝶形弹簧呈现了良好的中心自复位性

能。文献^[18]、^[19]将蝶形弹簧应用于不同种类结构的加固改造中,如钢筋混凝土双柱桥墩结构、钢框架以及钢筋混凝土结构等。此外,文献^[20]、^[21]通过将弹簧设置在倾斜的装置中组合形成准零刚度系统,得到系统动态刚度接近 0 的特性。本文在既有研究的基础上,将蝶形弹簧与钢丝绳两种装置组合在一起,提出了一种具有浮动式对压功能的新型蝶形弹簧-拉索减震器,并对其展开理论分析与设计,验证该新型减震装置的可行性。

1 减震器构造与特征

提出的新型浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器由套筒、蝶形弹簧、上下盖板、上下浮动压板、预压钢丝绳拉索等组合而成,如图 1 所示。蝶形弹簧放置在套筒内,其上下部分别与上下浮动板采用自由边界接触连接。上下浮动板、蝶形弹簧均在其中穿孔洞,钢丝绳拉索穿于孔洞中,其中一组拉索在上部与动压板通过防松螺栓连接,然后穿过上浮动压板、蝶形弹簧在下浮动板处与下浮动板固定连接;另一组拉索与下盖板连接,在连接处设置防松螺栓,拉索穿过下浮动板、蝶形弹簧在上浮动板处与上浮动板固定连接。防松螺栓处设计防松脱和可调节功能,即可调整钢丝绳拉索长度,实现内部蝶形弹簧双向对压的特征,进而调节弹簧-拉索减震器的刚度性能。套筒伸出的上下连接杆与结构构件相连,其中下连

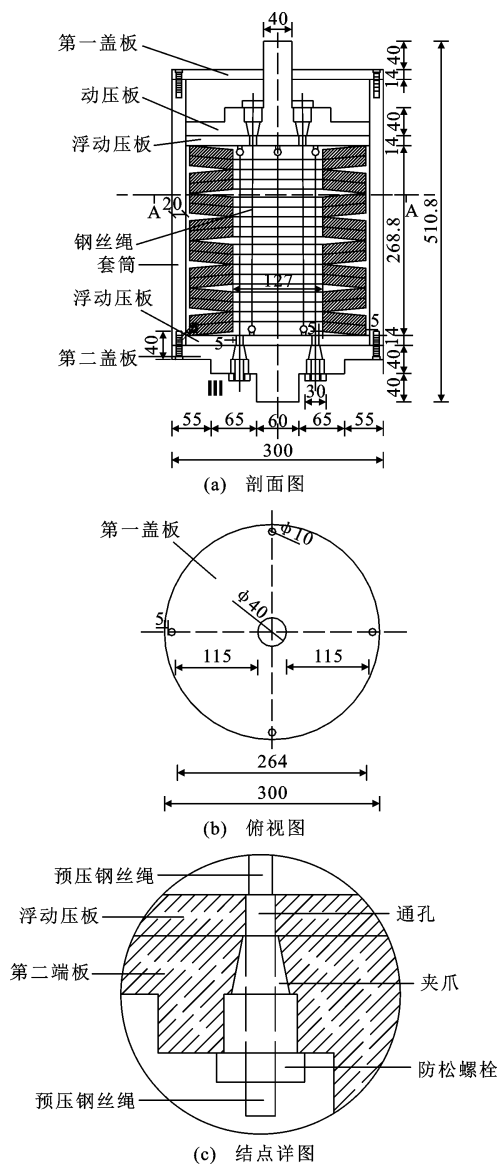


图1 新型浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器构造
(单位:mm)

Fig. 1 Construction of new-type floating counter pressure disc spring-stay cable shock absorber (unit:mm)

接杆与下盖板采用固定连接,上连接杆穿过上盖板,与上盖板之间自由边界设计。

新型浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器的主要功能特征和创新在于:①通过拉索调节,实现蝶形弹簧始终处于受压状态,不论减震器受拉荷载还是压荷载,减震器在相对变形下均能产生运动而发挥耗能功能;②减震器的初始刚度、运动幅度可通过调节内部蝶形弹簧的数量和预拉钢丝绳的长度实现可调,进而适应不同工程结构的变形和耗能需求;③基于套筒内部的上下浮动板,实现双向对压功能,构造简单,传力途径明确,有利于设计计算和加工制造,可改善传统蝶形弹簧减震器的线性度。

基于上述浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器,可将其独立设计安装于存在相对变形的构件中作为缓冲减震器使用,亦可采用非平行并联的方式组合形成三维减震控制装置(图2),将弹簧-拉索减震器的两端采用万向球铰支座与上下结构相连,即可实现三维减震。本文主要针对单组弹簧-拉索减震器展开设计与力学性能分析。

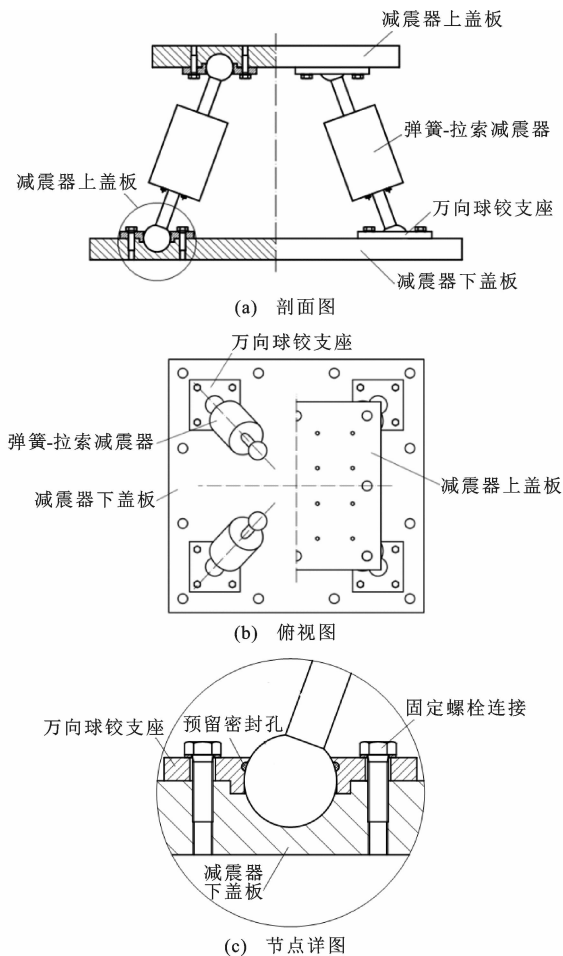


图2 基于弹簧-拉索减震器设计形成的三维减震技术装置

Fig. 2 Three-dimensional damping technology device based on spring-stay cable shock absorber

2 减震器参数设计

根据《蝶形弹簧》(GB/T 1972—2005)的规定,单片蝶形弹簧竖向承载力 P 与相应变形量 f 之间的关系为

$$P = \frac{4E}{1-\mu^2} \frac{t^4}{\alpha D^2} K_4^2 \frac{f}{t} \left[\beta^2 \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f}{t} \right) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f}{2t} \right) + 1 \right] \quad (1)$$

式中: E 、 μ 为蝶形弹簧材料的弹性模量和泊松比; D 、 t 为单片蝶形弹簧的外径和厚度; h_0 为自由高

度; α 、 β 、 K_4 为与形状有关的计算参数^[22]。

采用叠合对合形式的蝶形弹簧堆叠方式(图3),则组合后蝶形弹簧的竖向承载力 P_z 、竖向总变形量 f_z 、总高度 H_z 分别为

$$\left. \begin{aligned} P_z &= nP \\ f_z &= if \\ H_z &= i[H_0 + (n-1)t] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: i 为同规格蝶形弹簧的数量; H_0 为单个蝶形弹簧高度; n 为相向同规格叠合后再对合组合的蝶形弹簧组数量。

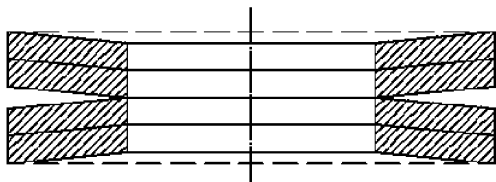


图3 叠合对合蝶形弹簧

Fig. 3 Composite combined disc spring

当考虑叠合弹簧各片之间的摩擦作用时,设摩擦系数为 f_M ,则以叠合对合形式堆叠而成的蝶形弹簧竖向承载力 P_{zR} 的计算公式为

$$P_{zR} = \frac{nP}{1 \pm (n-1)f_M} \quad (3)$$

当蝶形弹簧在荷载作用下处于压平状态时,其竖向承载力 P_c 的计算公式为

$$P_c = \frac{4E}{1-\mu^2} \frac{h_0 t^3}{K_1 D^2} K_4^2 \quad (4)$$

式中: K_1 为单片蝶形弹簧的竖向刚度。

根据式(2)可知,叠合对合蝶形弹簧的竖向总刚度 K 的计算公式为

$$K = \frac{K_2}{i} = \frac{nK_1}{1 \pm (n-1)f_M} = \frac{n}{1 \pm (n-1)f_M h_0} \cdot \frac{P_c}{h_0} \cdot \left\{ \beta^2 \left[\left(\frac{h_0}{2} \right)^2 - \frac{3h_0}{t} \frac{f}{t} + \frac{3}{2} \left(\frac{f}{t} \right)^2 \right] + 1 \right\} \quad (5)$$

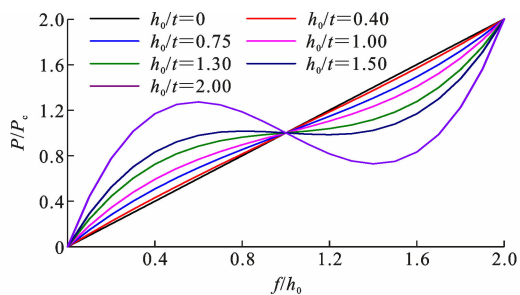
式中: K_2 为叠合后蝶形弹簧的竖向刚度。

由此得到叠合对合蝶形弹簧的变形耗能 U 的计算公式为

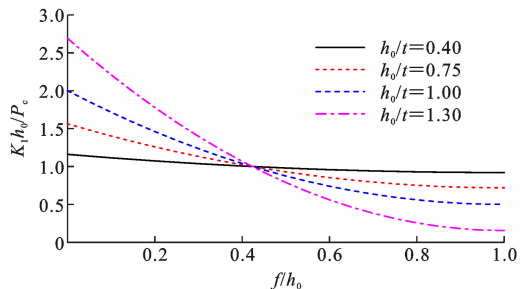
$$U = \frac{niP_c f^2}{2} \left[\beta^2 \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f}{2t} \right)^2 + 1 \right] \quad (6)$$

基于以上计算公式,可建立叠合对合蝶形弹簧的设计参数 P/P_c 、 $K_1 h_0/P_c$ 、 $2U/(P_c h_0^2)$ 与 f/h_0 之间的关系图,如图4所示。由图4可知,蝶形弹簧相关设计参数之间存在以下关系特征:

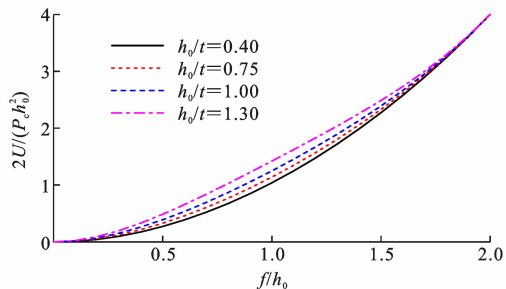
(1)如图4(a)所示,当高厚比 $h_0/t < 0.75$ 时, P/P_c 与 f/h_0 近似呈直线关系,相当于弹簧在弹性性能工作区间;当高厚比达到某一临界值时,蝶形弹



(a) 参数 P/P_c 影响曲线



(b) 参数 $K_1 h_0/P_c$ 影响曲线



(c) 参数 $2U/(P_c h_0^2)$ 影响曲线

图4 设计参数与 f/h_0 的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between design parameters and f/h_0

簧竖向承载力随变形出现准零刚度特性,即产生荷载很小、变形很大的现象;随着高厚比进一步增加,二者之间的关系曲线呈现明显的反“S”形弯曲现象,即 P/P_c 与高厚比之间呈现明显的非线性特征。

(2)如图4(b)所示,随着高厚比增大,蝶形弹簧竖向刚度与 f/h_0 之间的关系曲线呈现由接近水平直线的变化关系逐渐向陡峭的斜曲线变化的趋势,且高厚比越大,陡峭程度越明显,即随着 f/h_0 、高厚比的不断增大,蝶形弹簧的竖向刚度越小、竖向刚度降幅越大。

(3)如图4(c)所示,相同 f/h_0 条件下,蝶形弹簧的变形能随着高厚比的增大而不断增大,但增大幅度不明显,说明自由高度越高,蝶形弹簧能够承储的变形能 U 也越大;然而,当高厚比不变时,蝶形弹簧的变形能随着 f/h_0 的增大呈现明显的上升趋势,即变形能 U 能随着蝶形弹簧变形量的增大呈现不断增大的变化趋势。

3 力学性能试验研究

3.1 试件设计

新型浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器试件的总高为 622 mm,外圈直径为 190 mm,其中套筒总高 322 mm,上下伸出的连接杆长 150 mm、直径 20 mm,如图 5 所示。蝶形弹簧和钢丝绳拉索是减震器的主要部件,蝶形弹簧共有 20 片,组合方式为 2 片叠合、10 组对合,相关尺寸及设计参数见表 1,蝶形弹簧的内、外径尺寸分别为 72、140 mm,厚度为 8 mm,自由高度和蝶形弹簧的总高度分别为 3.2、11.2 mm;拉索钢丝绳有 2 组,直径均为 6 mm。

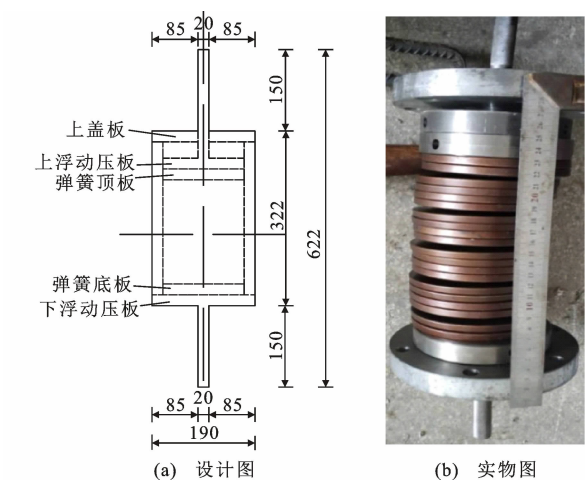


图 5 蝶形弹簧-拉索减震器(单位:mm)

Fig. 5 Disc spring-stay cable shock absorber (unit:mm)

外套筒为直径 190 mm、厚 20 mm、高 282 mm 的型钢圆柱筒,套筒上下面均开有直径为 10 mm、深 50 mm 的螺栓孔,与上下盖板相连;上下盖板为直径 190 mm、厚 20 mm 的圆钢板,其周边开 6 个直

径 10 mm 的螺栓孔与套筒相连,中间开直径 20 mm 孔以伸出上下连接杆;上下浮动板为直径 150 mm、厚 20 mm 的圆钢板,其上距离中心 27 mm 处对称开 3 个直径 12 mm 的圆孔用于钢丝绳穿过,中部同样开直径 20 mm 孔用于连接杆穿过。减震器各组装的元件实物图如图 6 所示。蝶形弹簧采用 50CrVA 弹簧钢,具有良好的耐疲劳性能,屈服强度为 1 280 MPa;其他型钢元件采用 20 号低碳钢,屈服强度为 245 MPa;各元件在加工过程中严格保证加工精度,公差设计在 0.02 mm 以内。

3.2 试件加载

采用 MTS 250 kN 电液伺服疲劳试验加载系统对蝶形弹簧减震器试件进行加载,试验机最大行程为 1 000 mm,能够满足试件加载需求,加载力和位移均通过加载系统内采得到,试件加载示意图如图 7 所示。

为系统研究该浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器的力学性能,分别采用静载和动载试验对蝶形弹簧-拉索减震器进行加载,并针对其拉伸和压缩荷载、等效刚度与阻尼比等性能参数展开分析研究。静载试验分为轴向拉伸和轴向压缩试验两种,采用位移控制加载方式,从平衡位置开始缓慢加载至设计允许变形量 24 mm(蝶形弹簧-拉索减震器的最大变形量为 32 mm)时停止加载,读取试验数据。动态加载试验同样采取位移控制加载方式,在平衡位置往复加载,考虑减震器预压量、加载频率、加载位移幅值等参数的影响,动态加载曲线示意图如图 8 所示,加载工况见表 2。

3.3 静态加载试验结果分析

图 9 给出了静态压缩、拉伸加载作用下蝶形弹

表 1 蝶形弹簧元件尺寸及设计参数

Table 1 Dimension and design parameters of disc spring element

外径/mm	内径/mm	厚度/mm	自由高度/mm	总高度/mm	设计变形量 f/mm	承载力 P/kN	屈服强度 σ /MPa
140	72	8	3.2	11.2	2.4	75.3	1 280

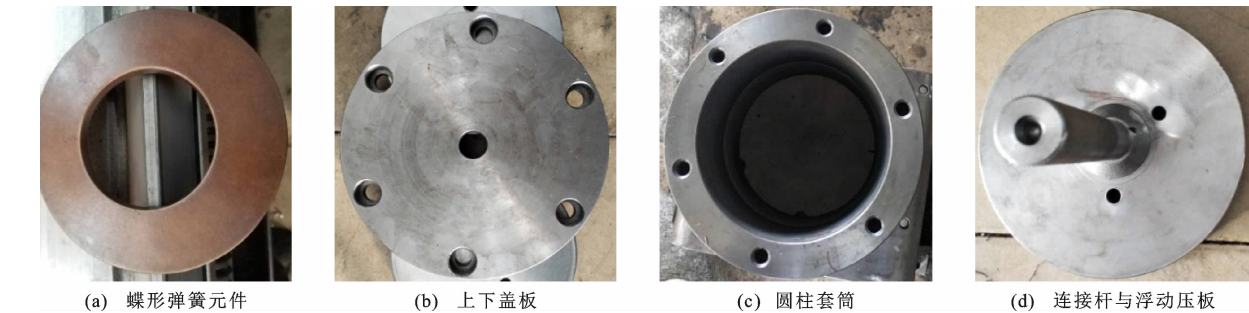


图 6 减震器组装元件

Fig. 6 Assembly elements of shock absorber

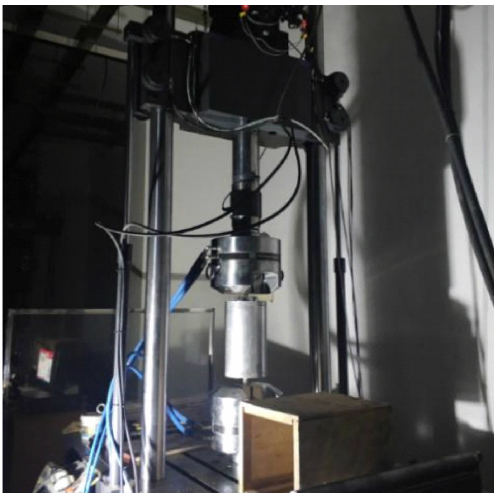


图 7 减震器加载示意图

Fig. 7 Schematic diagram of shock absorber loading

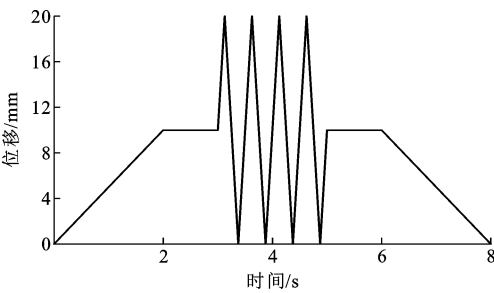


图 8 动态加载曲线示意图

Fig. 8 Schematic diagram of dynamic loading curve

表 2 试验加载工况

Table 2 Test loading condition

加载工况	预压变形量/mm	加载频率/Hz	加载位移幅值/mm
1~4	6	0.5、1.0、1.5、2.0	6
5~8	8	0.5、1.0、1.5、2.0	6
9~12	10	0.5、1.0、1.5、2.0	6
13~15	10	1.0	4、8、10

簧-拉索减震器的荷载-位移关系曲线。由图 9 可知,随着加载位移增大,减震器承载能力与加载位移呈线性变化规律,承载能力随着加载位移的增大而增大。进一步将静态加载试验结果与理论规范计算结果进行对比分析,当压缩、拉伸加载至减震器设计允许变形量(24 mm)时,对应的试验压缩、拉伸承载力分别为 178、183 kN,与理论计算结果 171 kN 之间的相对误差分别为 3.93%、6.56%;当压缩、拉伸加载至减震器最大变形量(32 mm)时,对应的试验压缩、拉伸承载力分别为 227、232 kN,与理论计算结果 223 kN 之间的相对误差分别为 1.76%、3.88%。可见,所设计的新型蝶形弹簧-拉索减震器在静载作

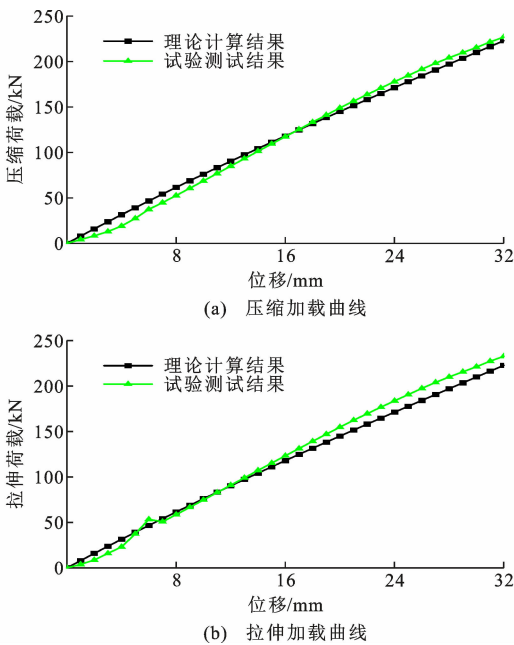


图 9 静态加载时减震器荷载-位移关系曲线

Fig. 9 Load-displacement relationship curves of shock absorber under static loading

用下不仅荷载-变形变化规律与设计理论相吻合,而且与规范的计算结果相差很小,在可接受的范围以内,说明所设计的新型减震器是合理可靠的,满足力学性能要求。

3.4 动态加载试验结果分析

为进一步验证动态荷载作用下蝶形弹簧减震器的力学性能,将其与数值模拟结果进行对比分析,具体建模过程参考文献[23]。荷载-位移关系曲线对比如图 10 所示,试验结果与模拟结果吻合良好,15 组工况等效刚度、等效阻尼比的最大相对误差分别为 6.82%、9.86%,平均相对误差仅为 2.31%、4.99%。

图 11 给出了动态加载时不同预压量、频率、幅值条件下蝶形弹簧-拉索减震器的荷载-位移关系曲线,表 3 给出了不同工况对应的等效刚度和等效阻尼比。由图 11 可知,不同工况下减震器的荷载-位移曲线表现出上下不对称的翅膀形状,峰值荷载均小于其理论设计荷载(171 kN),表明减震器均处于弹性工作范围。

在相同预压变形条件下,蝶形弹簧-拉索减震器的等效刚度和等效阻尼比随着加载频率的增大均呈现一定的下降趋势,但下降幅度不大。在 6、8、10 mm 预压变形量条件下,加载频率从 0.5 Hz 增加到 2 Hz 时等效刚度的降幅分别为 2.59%、1.98%、1.97%,等效阻尼比的降幅分别为 7.89%、3.37%、5.31%。

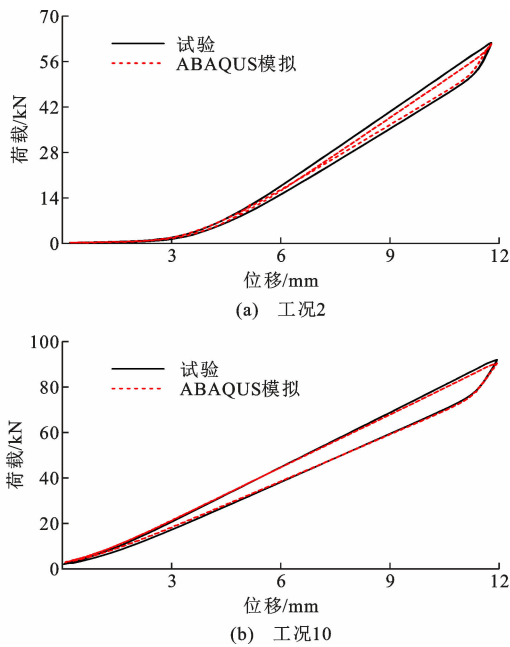


图10 荷载-位移关系曲线对比

Fig. 10 Comparison of load-displacement relationship curves

在相同加载频率条件下,蝶形弹簧-拉索减震器的等效刚度和等效阻尼比随着加载频率的增大均呈现线性、逐渐增大的变化趋势,说明预压变形量对减震器等效刚度和等效阻尼比的影响很大。当加载频率为 0.5 Hz 时,减震器在 6、8、10 mm 预压变形量下的等效刚度分别为 5.41、6.58、7.6 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,对应的等效阻尼比分别为 7.6%、8.9%、10.3%,上升幅度分别为 40.48%、35.53%;当加载频率为 2 Hz 时,减震器在 6、8、10 mm 预压变形量下的等效刚度分别为 5.27、6.45、7.45 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$,对应的等效阻尼比分别为 7%、8.6%、9.7%,上升幅度分别为 41.37%、38.57%。等效阻尼比随预压变形量不断增大的原因在于预压变形量的增大使蝶形弹簧片之间的压力上升,进而产生更大的库伦摩擦力,导致减震器耗能能力增加,引起等效阻尼比上升。

在相同加载频率和预压变形量条件下,蝶形弹簧-拉索减震器的等效刚度随着加载频率的增大呈现不断降低的变化趋势,在加载频率为 1 Hz、预压变形量为 10 mm 条件下,减震器在 4、6、8、10 mm 加载幅值下的等效刚度依次为 8.21、7.56、6.76、6.14 $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。相反,蝶形弹簧-拉索减震器的等效阻尼比随着加载频率的增大呈现不断增大的变化趋势,在加载频率为 1 Hz、预压变形量为 10 mm 条件下,减震器在 4、6、8、10 mm 加载幅值时的等效阻尼比依次为 8.6%、9.9%、10.7%、14.3%,说明振

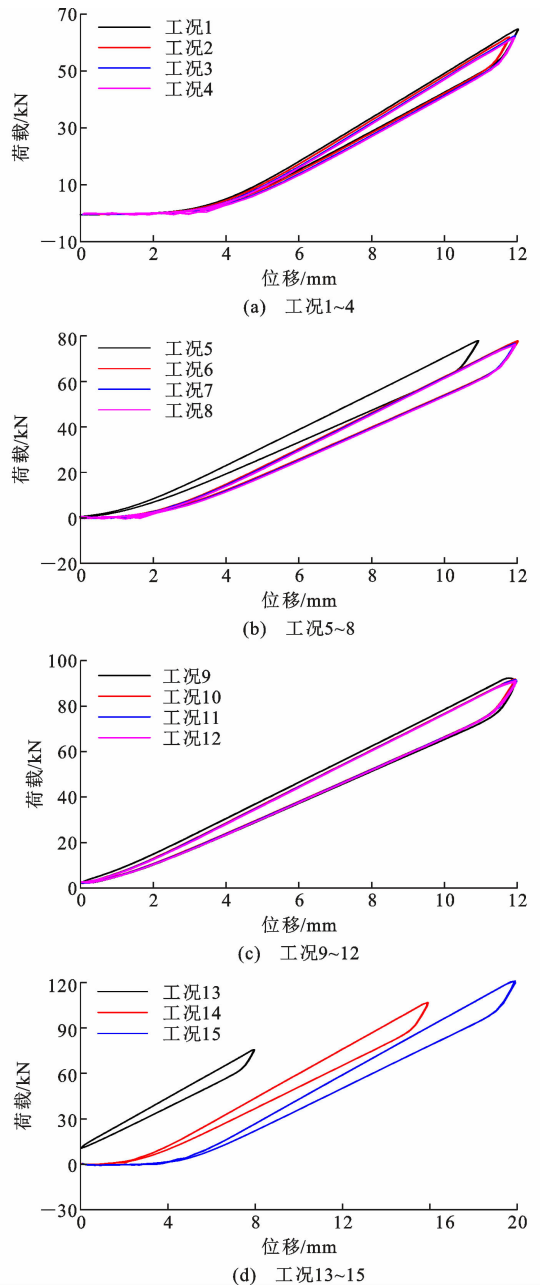


图11 动态加载时减震器荷载-位移关系曲线

Fig. 11 Load-displacement relationship curves of shock absorber under dynamic loading

动位移越大,蝶形弹簧-拉索减震器的耗能能力越能得到充分发挥。

4 结语

(1)提出的新型蝶形弹簧-拉索减震器在拉、压荷载作用下,其内部的叠合对合蝶形弹簧组始终处于受压状态,可通过调节预拉钢丝绳拉索的长度改变减震器的初始刚度,满足不同场合设计需求。

(2)推导了浮动式对压蝶形弹簧-拉索减震器设计计算公式,建立了叠合对合蝶形弹簧的设计参数

表 3 减震器等效刚度和等效阻尼比

Table 3 Equivalent stiffness and equivalent damping ratio of shock absorber

加载工况	预压变形量/ mm	加载频率/ Hz	等效刚度/ (kN·mm ⁻¹)	等效阻尼 比/%
1	6	0.5	5.41	7.6
2	6	1.0	5.40	7.5
3	6	1.5	5.29	7.0
4	6	2.0	5.27	7.0
5	8	0.5	6.58	8.9
6	8	1.0	6.49	8.7
7	8	1.5	6.49	8.6
8	8	2.0	6.45	8.6
9	10	0.5	7.60	10.3
10	10	1.0	7.56	9.9
11	10	1.5	7.48	9.7
12	10	2.0	7.45	9.7
13	10	1.0	8.21	8.6
14	10	1.0	6.76	10.7
15	10	1.0	6.14	14.3

P/P_c 、 K_1h_0/P_c 、 $2U/(P_ch_0^2)$ 与 f/h_0 、 h_0/t 之间的量化关系。当 h_0/t 小于 0.75 时,蝶形弹簧组将处于弹性工作区间, P/P_c 与 h_0/t 呈近似线性关系;随着 f/h_0 、 h_0/t 的不断增大,蝶形弹簧的竖向刚度越小、降幅越大;相同 f/h_0 条件下,蝶形弹簧变形能 U 随 h_0/t 增大而缓慢增大,但在相同 h_0/t 条件下,蝶形弹簧变形能 U 随 f/h_0 增大呈现明显的上升趋势。

(3)在静态加载作用下,蝶形弹簧-拉索减震器的承载能力与加载位移之间呈线性变化关系,承载能力随位移的增大而增大,其静态压缩、拉伸测试结果与理论计算结果相吻合,二者在设计允许变形量(24 mm)下的相对误差分别为 3.82%、7.32%,在最大变形量(32 mm)下的相对误差分别为 4.21%、4.47%,验证了所设计的新型蝶形弹簧-拉索减震器的合理性。

(4)相同预压变形条件下,减震器的等效刚度和等效阻尼比随加载频率增加呈缓慢下降趋势,最大降幅仅为 2.59%;相同加载频率条件下,减震器的等效刚度和等效阻尼比随预压变形量增加呈线性、明显增大的变化趋势,在 2 Hz 加载频率时等效刚度和等效阻尼比的增幅分别为 41.37%、38.57%;相同加载频率、预压变形量条件下,减震器的等效刚度随加载频率增大而不断降低,但等效阻尼比随加载频率增大而不断上升,加载幅值增大有助于提升减震器的耗能能力。

参考文献:

References:

[1] 汪大洋,周云,王烨华,等.粘滞阻尼减震结构的研究与应用进展[J].工程抗震与加固改造,2006,28(4):22-31.
WANG Dayang, ZHOU Yun, WANG Yehua, et al. State-of-the-art of research and application on structures with viscous damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(4): 22-31.

[2] 付伟庆,李茂,张春巍,等.基于被动变阻尼装置高层结构风振控制效果对比分析[J].地震工程与工程振动,2019,39(5):95-103.
FU Weiqing, LI Mao, ZHANG Chunwei, et al. Wind vibration control comparative analysis of passive variable damping device in high-rise buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(5): 95-103.

[3] 张尚荣,刘欣雨,李仕浩,等.基于 Maxwell 模型的大底盘双塔楼复合被动控制[J].工业建筑,2022,52(8):119-126.
ZHANG Shangrong, LIU Xinyu, LI Shihao, et al. Composite passive control of twin-tower structure with large chassis based on Maxwell model[J]. Industrial Construction, 2022, 52(8): 119-126.

[4] 黄昆,邹立华.底层柔性柱隔震结构半主动控制研究[J].工业建筑,2014,44(1):19-23.
HUANG Kun, ZOU Lihua. Study of isolation structures with underlying flexible column by semi-active control[J]. Industrial Construction, 2014, 44(1): 19-23.

[5] 李歆,吕西林,DYKE S. 磁流变阻尼器的半主动控制及实时混合模拟试验研究[J].世界地震工程,2018,34(4):130-135.
LI Xin, LU Xilin, DYKE S. A study on semi-active control for MR damper and experimental validation using RTHS[J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(4): 130-135.

[6] 周云,吴从晓,张崇凌,等.芦山县人民医院门诊综合楼隔震结构分析与设计[J].建筑结构,2013,43(24):23-27.
ZHOU Yun, WU Congxiao, ZHANG Chongling, et al. Analysis and design of seismic isolation structure in outpatient building of the Lushan county people's hospital[J]. Building Structure, 2013, 43(24): 23-27.

[7] 葛根旺,王军伟,晋宇.高层隔震结构的应用现状与研究进展[J].工程抗震与加固改造,2020,42(6):53-62,69.

- GE Genwang, WANG Junwei, JIN Yu. Application status and research progress of high-rise isolated structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(6): 53-62, 69.
- [8] 王振东,孟祥玉,阳 烨,等.基础隔震结构在天津市某软弱场地应用研究[J].施工技术,2018,47(10): 27-31.
- WANG Zhendong, MENG Xiangyu, YANG Ye, et al. Application research of base isolated structures in Tianjin at a soft site[J]. Construction Technology, 2018, 47(10): 27-31.
- [9] 陶连金,安军海,葛 楠.地铁车站工程应用双向 RFPS 支座隔震效果研究[J].地震工程与工程振动, 2016,36(1):52-58.
- TAO Lianjin, AN Junhai, GE Nan. Isolation effect analysis on bidirectional RFPS bearing applied in the metro stations engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(1): 52-58.
- [10] 谭 平,兰 李,贺 辉,等.悬吊结构体系优化设计及减震性能研究[J].建筑科学与工程学报,2021, 38(1):51-60.
- TAN Ping, LAN Li, HE Hui, et al. Optimal design and damping performance research of suspension structural system[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1): 51-60.
- [11] 王 亚,杨维国,聂焱森,等.两种新型滑板型文物隔震支座设计及性能研究[J].工程科学与技术,2018, 50(6):56-64.
- WANG Ya, YANG Weiguo, NIE Yansen, et al. Design and performance study of two new sliding relics isolation bearings [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(6): 56-64.
- [12] 杜永峰,李 虎,李芳玉.PC 基础隔震结构新型隔震层框架节点抗震性能分析[J].工程科学与技术, 2021,53(5):32-42.
- DU Yongfeng, LI Hu, LI Fangyu. Analysis on seismic behavior of a new frame joint of isolation layer in PC base-isolated structure[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(5): 32-42.
- [13] 尚守平,曹 勇,崔向龙.新型三维隔震墩振动台试验与数值分析[J].建筑科学与工程学报,2018,35(2): 30-37.
- SHANG Shouping, CAO Yong, CUI Xianglong. New three-dimension isolation pier vertical vibration table test and numerical analysis[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2): 30-37.
- [14] MA L C, SHI Q X, WANG B, et al. Research on design and numerical simulation of self-centering pre-fabricated RC beam-column joint with pre-pressed disc spring devices[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 166: 107762.
- [15] CHOU C C, CHUNG P T. Development of cross-anchored dual-core self-centering braces for seismic resistance [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 19-32.
- [16] XU L H, FAN X W, LI Z X. Development and experimental verification of a pre-pressed spring self-centering energy dissipation brace [J]. Engineering Structures, 2016, 127: 49-61.
- [17] NOURELDIN M, MEMON S A, GHARAGOZ M, et al. Performance-based seismic retrofit of RC structures using concentric braced frames equipped with friction dampers and disc springs [J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112555.
- [18] DONG H H, DU X L, HAN Q, et al. Performance of an innovative self-centering buckling restrained brace for mitigating seismic responses of bridge structures with double-column piers [J]. Engineering Structures, 2017, 148: 47-62.
- [19] FAN X W, XU L H, LI Z X. Seismic performance evaluation of steel frames with pre-pressed spring self-centering braces [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105761.
- [20] 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(3/4/5): 678-689.
- [21] KOVACIC I, BRENNAN M J, WATERS T P. A study of a nonlinear vibration isolator with a quasi-zero stiffness characteristic [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 315(3): 700-711.
- [22] ALMEN J O, LASZLO A. The uniform-section disk spring [J]. Journal of Fluids Engineering, 1936, 58(4): 305-314.
- [23] 肖发平.新型三维隔震装置设计及其在古木结构中应用研究[D].广州:广州大学,2018.
- XIAO Faping. Design of new type three-dimensional seismic isolation device and application study in ancient timber structure [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.