

双层压杆支撑结构耗能特性及减振性能研究

孟祥剑¹, 方 辉², 孙晓红¹, 付正一¹, 刘志勇¹

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司国家工程技术研究中心, 山东 青岛

²中国海洋大学工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2023年2月22日; 录用日期: 2023年3月23日; 发布日期: 2023年3月31日

摘 要

波浪砰击载荷易引起导管架平台整体和局部结构剧烈振动, 导致结构疲劳损伤和设备失效。为使振动快速衰减, 设计了一种多稳态钢质撑杆结构, 其中内置双层压杆具备高刚度高阻尼特性。循环载荷下, 双层压杆激励与响应发生反向, 产生滞后阻尼。结合层合结构刚度等效和杆件稳定分析方法, 理论计算了双层压杆多稳态跳变阈值, 建立了典型结构参数与弯曲中性轴间的联系。而后讨论了承载和耗散特性的几何参数相关性。将新型撑杆引入导管架平台, 数值模拟砰击载荷并分析导管架自由振动, 耗散撑杆不改变导管架结构刚度的同时大大提高了动能转换效率。导管架振幅衰减系数近8倍于传统导管架结构。

关键词

多稳态, 双层压杆, 滞后阻尼, 高刚度, 砰击载荷

Energy Dissipation Characteristics and Vibration Reduction Performance of Bilayered Bracing Structure

Xiangjian Meng¹, Hui Fang², Xiaohong Sun¹, Zhengyi Fu¹, Zhiyong Liu¹

¹National Engineering Technology Research Center, CRRC Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao Shandong

²School of Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: Feb. 22nd, 2023; accepted: Mar. 23rd, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

The severe overall and local vibration of jacket platform are triggered by wave slamming load,

文章引用: 孟祥剑, 方辉, 孙晓红, 付正一, 刘志勇. 双层压杆支撑结构耗能特性及减振性能研究[J]. 声学 & 振动, 2023, 11(1): 19-30. DOI: 10.12677/ojav.2023.111003

resulting in structural fatigue damage and equipment failure. In order to reduce the vibration rapidly, a multi-stable bracing system was designed, in which the built-in bilayered column presented high stiffness and damping. The excitation and response of bilayered column created reverse under cyclic load, then inducing hysteresis damping. Based on the combination of stiffness equivalence of laminated structure and method of stability analysis, the multi-stable jump threshold was calculated theoretically, and the relation between typical structural parameters and bending neutral axis was established. Subsequently, the effect of geometrical parameters on bearing and dissipation characteristics was discussed. Finally, the slamming load was implemented numerically to jacket platform containing new braces. The results show that the kinetic energy conversion efficiency is greatly improved and the stiffness of jacket platform remains unchanged. The amplitude decay coefficient is nearly 8 times of the traditional jacket structure.

Keywords

Multi-Stable, Bilayered Column, Hysteresis Damping, High Stiffness, Slamming Load

Copyright © 2023 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

导管架海洋平台经过前期结构设计使其固有频率远离大部分波浪载荷频率范围, 通常具备良好的抗风浪性能。而少部分波浪冲击载荷(如: 破碎波冲击)时间短且幅值高, 将使得导管架海洋平台产生较大幅值振动, 已成为导管架海洋平台结构损伤的主要来源[1] [2] [3]。传统上, 工程师利用金属结构高刚度控制结构变形, 然而, 高刚度属性有利于低衰减振动传播。粘弹性材料可增强结构阻尼, 加快结构振动衰减速率[4] [5], 成为海洋工程结构减振方案的普通选择。根据线弹性理论, 阻尼器需要一定比例粘弹性材料发挥高耗散效果, 但这会降低整体结构的刚度且增加了自重[6]。另外, 结构大变形有利于提高阻尼而不利于承载[7]。相反, 高承载对应高刚度和小变形, 就不能有效抑制振动衰减和传播。因此, 高阻尼与高承载的设计原理相悖, 这是线性理论中难以解决的一对矛盾, 而实现高刚度兼顾高阻尼的工程结构, 是海洋工程亟需开发的技术难点。

根据层合结构刚度理论和杆件结构稳定分析方法, 本文设计了一种固支与简支边界可相互转换的双层压杆。在数值模拟正弦加载力作用下, 该压杆的稳态随载荷发生转换, 刚度也随之退化, 由此产生的负刚度使得激励 - 响应形成滞后回环。基于杆件结构屈曲大变形理论, 建立双层压杆的稳定状态控制方程, 得出与结构几何和材料参数对应的屈曲、后屈曲载荷及弯曲构型。而结构参数化分析, 进一步为此压杆刚度和阻尼综合优化提供指导。最后, 将双层压杆引入导管架平台, 利用数值模拟方法, 分析砰击载荷下导管架平台的振动特性, 并与传统弹塑性导管架的振动衰减进行对比。

2. 双层压杆多稳态结构

为实现静态高承载、动态高耗散和整体低自重的更优设计, 本文提出了一种轻质柔性材料(如: 有机玻璃、聚乙烯、橡胶等)和高刚度金属材料组成的双层压杆(图 1)。本文轻质柔性材料选为有机玻璃, 同时, 在数值模拟中仅考虑其线弹性属性。

2.1. 有限元分析

为保证双层压杆始终处于良好的端部约束状态，两个钢板分别置于双层压杆两端。此外，四根线弹簧单元分别设置于钢板的四个角，以防止双层压杆发生压溃变形。同时，本文设计了两个刚性框架，装配于双层压杆的外部形成撑杆系统(图 2)，确保撑杆在拉压载荷作用下双层压杆一直产生压缩变形。当施加压缩载荷时，两个刚性框架运动趋向于贴合，使得双层压杆发生压缩变形；当施加拉伸载荷时，刚性框架相互分离，使得双层压杆仍承受压缩载荷。双层压杆几何参数列于表 1 中。刚性框架、钢板及双层压杆结构中材料属性[8]列于表 2。为充分展示双层压杆的滞回性能，本文将刚性框架和钢板设置为完全刚性。双层压杆端部与钢板设置面接触，切向“hard”接触，法向为“rough”接触。所有结构采用 8 节点减缩积分单元(C3D8R)，网格尺寸为 5 mm，整个模型共 36,318 个单元。隐式算法[9]可灵活调整增量步，大大提高了计算效率，用于本文撑杆结构有限元模型计算。

在撑杆顶部施加正弦载荷力(幅值： $8.0 \times 10^5 \text{N}$ ；频率：0.25 Hz)，而底部进行固定处理(图 3(a))。图 3(b)为双层压杆端部轴向支反力(纵轴)与撑杆顶部位移(横轴)的滞回曲线。简单的滞回曲线详细反映了压杆复杂的变化过程，根据图 3(b)所示，具体如下：

- 1) 0~1 阶段：根据材料力学可知，此时双层压杆保持直杆构型(图 4)，支反力与位移呈正比例关系，边界为压合固支。
- 2) 1~1'阶段：依据杆件稳定理论，压杆由直杆平衡转向微弯平衡，呈现局部弯曲构型。随着端部接触面积大幅减小，支反力作用点产生向端部边线转移趋势。
- 3) 1'~2~3 阶段：继续加载不久后，压杆支反力达到边界转换载荷并跳转入整体弯曲平衡(图 4)。瞬时，压杆承载出现大幅落差，并快速通过负刚度阶段进入低刚度状态。支反力 - 位移曲线转向，压杆固支边界完全消失，取而代之为简支边界。

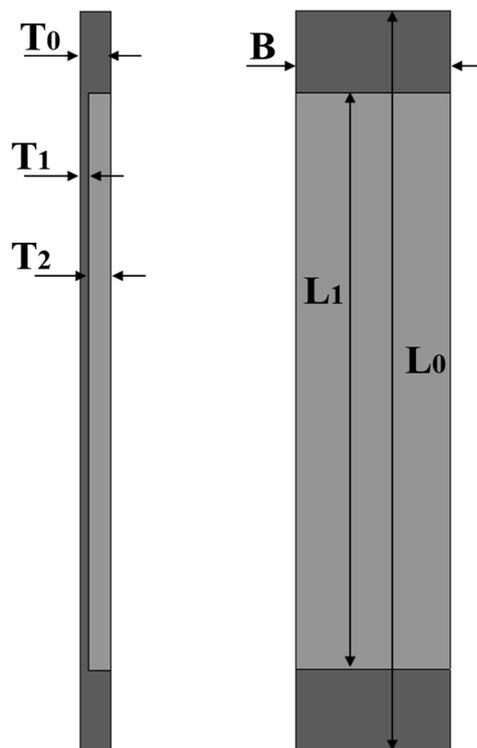


Figure 1. Schematic diagram of bilayered column
图 1. 双层压杆示意图

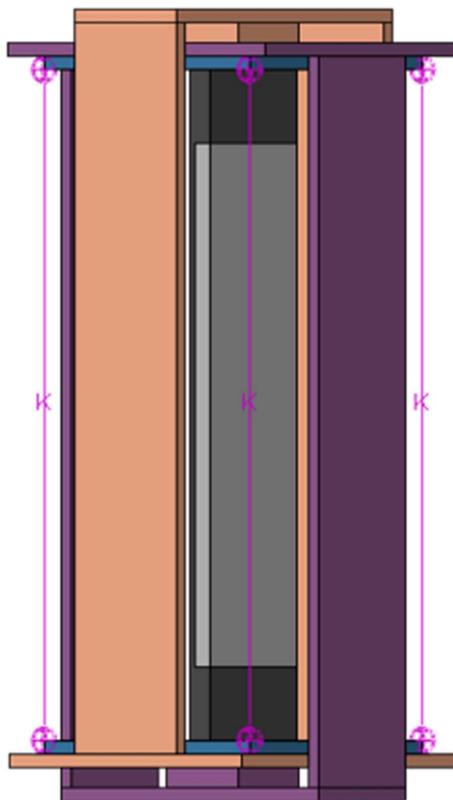


Figure 2. A brace system with bilayered column
图 2. 内置双层压杆的撑杆系统

Table 1. Geometrical parameters of bilayered column (unit: mm)
表 1. 双层压杆几何参数(单位: mm)

几何尺寸	L_0	L_1	T_0	T_1	T_2	B
钢材结构	1000	780	40	10	—	200
柔性结构	—	780	—	—	30	200

Table 2. Material property
表 2. 材料属性

材料	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比	屈服强度(MPa)
钢材	7800	210	0.30	455
有机玻璃	1100	2.6	0.35	52

4) 3~4~0 阶段: 卸载过程中, 两端简支双层压杆的弯曲变形随支反力缓慢增加而快速恢复。经过临界点后, 压杆端部恢复至压合状态, 同时压杆恢复至高刚度高承载的直杆平衡状态。

上述分析中, 双层压杆的直杆 - 局部弯曲 - 整体弯曲 - 直杆平衡状态随载荷正弦变化依次出现, 刚度随之改变并出现负刚度非稳态过程, 使得支反力 - 位移产生相位差, 形成滞后回环。回环面积取决于压杆几何和材料, 而加载力 - 位移曲线回环形状可随弹簧刚度变化而改变。图 3(c)展示出了弹簧反力对滞后回环形状的影响。在强度方面, 图 4 中应力云图显示, 双层压杆一直处于材料屈服强度下。

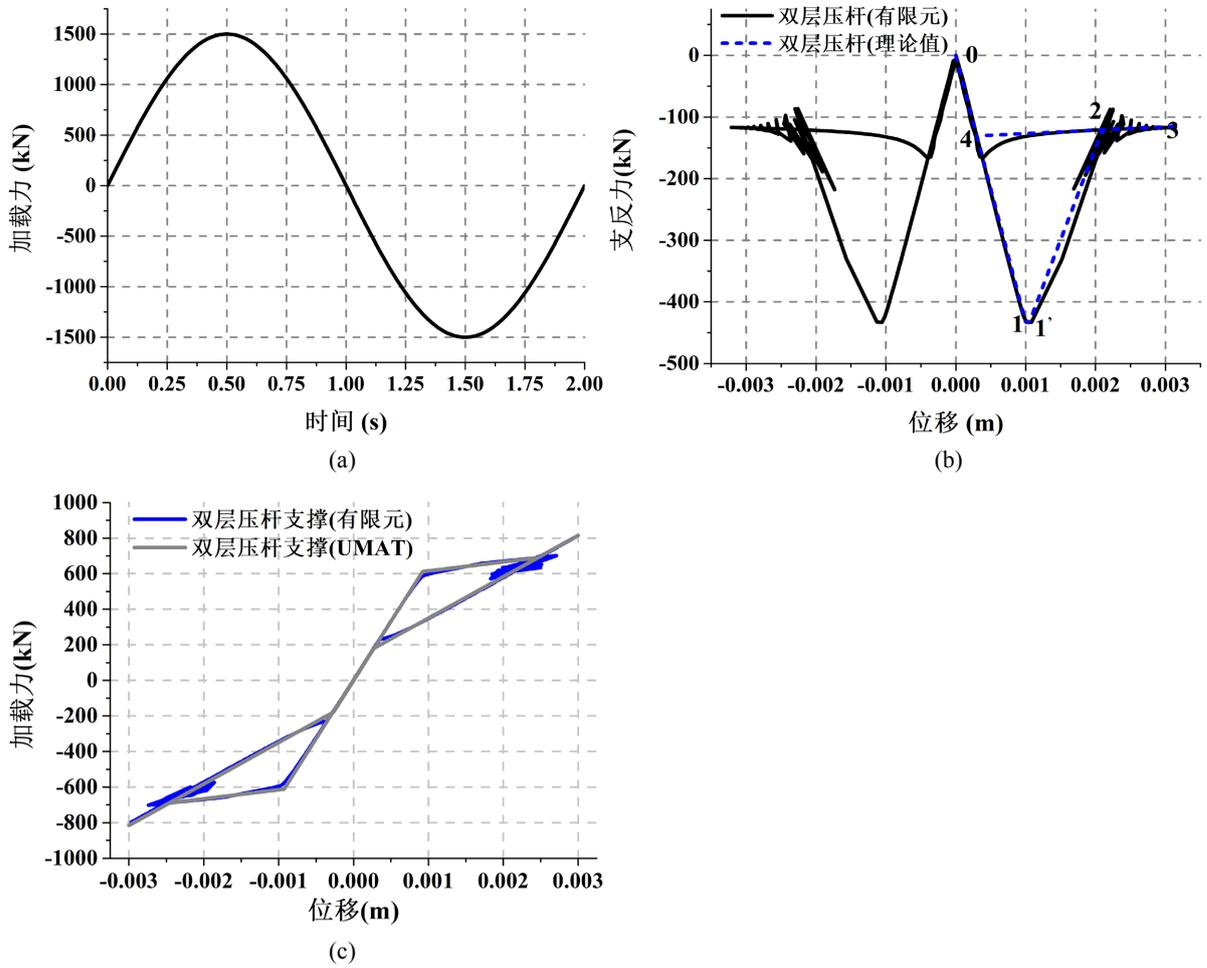


Figure 3. The results of multistable column under sinusoidal load; (a) The sinusoidal force; (b) The curve of reaction force and displacement; (c) The curve of reaction force plus linear spring force and displacement

图 3. 正弦载荷下多稳态压杆输出结果; (a) 正弦加载力; (b) 压杆支反力 - 位移关系曲线; (c) 压杆加载力 - 位移关系曲线

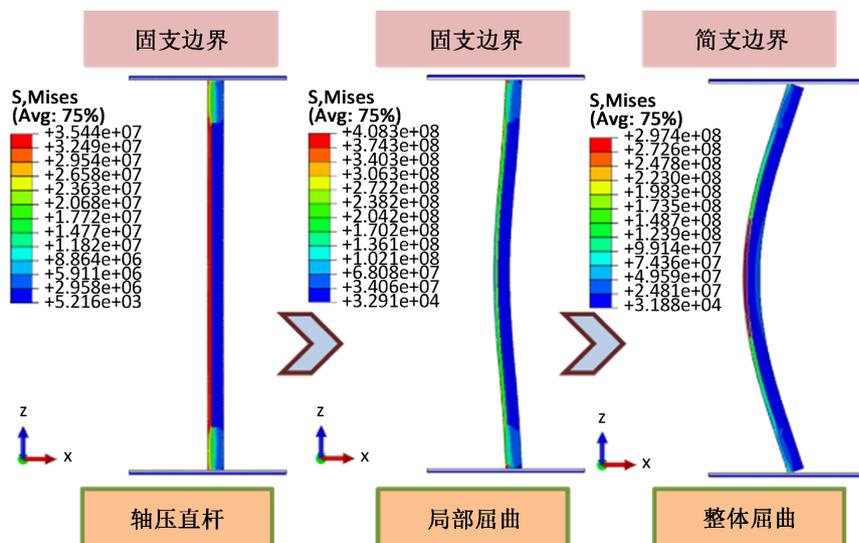


Figure 4. Buckling modes of bilayered column under compression force (magnify deformation 3 times)

图 4. 压缩力作用下双层压杆的屈曲模式变化(变形放大 3 倍)

2.2. 理论分析

2.2.1. 双层梁刚度特性分析

杆件屈曲分析本质是求解微弯曲状态下的平衡方程，而掌握抗弯刚度表达式是屈曲分析的前提。两种不同材料的杆件结构粘贴在一起，形成层合结构。这里可视此层合结构为双层梁。图 5(a)中为材料和厚度均不同而宽度和长度相同的双层梁。模量 E_1 、 E_2 表示①梁和②梁的弹性模量。 l 和 w 表示压杆长度和宽度， T_1 和 T_2 分别代表①梁和②梁的厚度。在外部弯矩作用下，两根梁间的粘结作用，使得两根梁界面产生连续变形，如图 5(b)所示。为便于分析，双层梁亦可等效为一种均质梁。等效抗弯刚度如下：

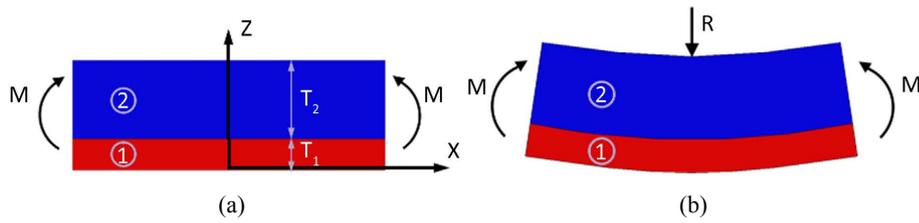


Figure 5. Schematic diagram of the equivalent process of bending deformation for bilayered beam; (a) Diagram of bending moment of bilayered column; (b) Bending deformation of bilayered column

图 5. 双层梁弯曲变形等效过程示意图；(a) 端部转动假设；(b) 双层梁弯曲变形

$$K_d = E_1 I_1 \left[1 + V^3 + \frac{3V(1 + T_2/T_1)^2}{1 + V} \right] \quad (1)$$

其中 $V = E_2 T_2 / E_1 T_1$ 。另外，梁的抗压刚度为 $K_c = E_1 A_1 + E_2 A_2$ 。其中， $A_1 = T_1 B$ 和 $A_2 = T_2 B$ 分别双层压杆中间区域①梁和②梁的截面积。

2.2.2. 双层压杆屈曲与后屈曲分析

本节屈曲分析中，双层压杆抗弯和抗压刚度均通过上述计算得出。当支反力低于临界屈曲载荷时，压杆呈现初高刚度的直杆平衡状态，表现为静态高承载。根据杆件拉压变形，压杆支反力与位移关系如下：

$$F = K_c u / 2L \quad (2)$$

式中 $L = L_0 / 2$ 为压杆长度 1/2，模型坐标系设置如图 6(a)所示。若支反力达到临界屈曲载荷时，压杆产生局部屈曲。此处假设压杆端部为半径非常大的圆弧[10]，如图 6(b)所示。当屈曲发生时，载荷 F 作用线偏移量为 $d = R\theta$ (θ 转角非常小)。实际压杆端部为平面，则 $R/L \rightarrow \infty$ 。经计算得出压合边界双层压杆的屈曲载荷为

$$F_{cr1} = \frac{\pi^2 K_d}{L^2} \quad (3)$$

由边界条件和微分方程通解可得，双层压杆发生局部屈曲的微弯曲挠度如下：

$$y(X) = D_4 (1 - \cos 2X) \quad (4)$$

当载荷进一步小幅增加，压杆横向变形加剧，难以承受更大载荷，进而发生整体屈曲大变形，带动边界转为线接触。切线刚度进入负值阶段，而边界转换载荷仅略大于临界屈曲载荷。依据大变形理论和伽辽金方法，经计算求解得出：

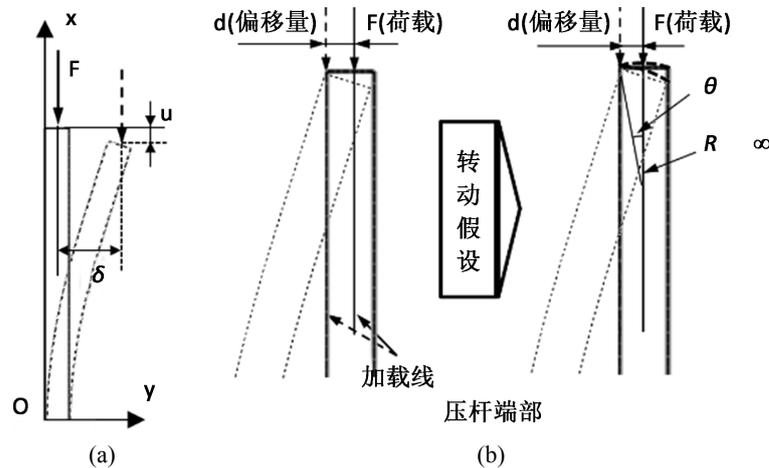


Figure 6. The analytic model of bilayered column; (a) The coordinate system setting; (b) Rotation hypothesis of the ends

图 6. 压杆解析模型; (a) 坐标系设置; (b) 端部转动假设

$$\frac{F_{cr2}}{F_{cr1}} = 1 + \frac{\pi^2 d^2}{8L^2} \quad (5)$$

当压杆支反力超过 F_{cr2} 时, 其作用点转移至端部边角, 压杆变形快速跳转至整体屈曲状态。压杆边接触状态类似于两端铰接的弯曲梁, 因此可假设此时压杆变形方程为 $y_{im} = y_0 \sin(X)$, 则压杆微分方程可写为:

$$\frac{d^2 y}{dX^2} - \frac{d^2 y_{im}}{dX^2} = \lambda^2 [\delta - y(X) + e] \quad (6)$$

上式中, e 表示载荷作用线与中性轴偏心距。根据边界条件为 $y(0) = 0$ 和 $y\left(\frac{\pi}{2}\right) = \delta$, 上式方程求得近似解[11]:

$$y(X) = \frac{y_e}{1 - F/F_b} (1 - \cos X) \quad (7)$$

式中, F_b 和 y_e 分别为 $\pi^2 K_d / 4L^2$ 和 $y_0 + e\pi^2 / 8$ 。根据文献[12]所述, 压杆的垂向位移 u 为:

$$u = L(\pi y_e / 2L)^2 \frac{F/F_b (1 - F/2F_b)}{(1 - F/F_b)^2} \quad (8)$$

上述解析中分析对象为双层梁结构的等效均质压杆, 并未考虑压杆端部结构的影响[11], 但可调整压杆有效长度得出接近有限元结果的近似解。本节利用表 1 和表 2 中双层压杆参数, 计算双层压杆在稳态转换中的临界屈曲载荷和位移, 并与有限元结果进行对比。若保证理论分析中临界屈曲载荷与有限元结果相同, 则双层梁的长度约为 850 mm。此长度介于双层压杆总长度与柔性结构层长度之间。图 3(b) 显示, 理论值与有限元结果相一致。

2.3. 结构参数分析

根据上述分析结果, 双层压杆的力学特性与其几何和材料参数密切相关。由杆件结构稳定理论可知, 长细比是影响杆件的屈曲及后屈曲的重要参数之一[13]。本节利用 ABAQUS 隐式动态求解器, 模拟循环载荷作用。以表 1 和表 2 中双层压杆的几何参数和材料参数为基础, 本节通过改变厚度 T_2 和柔性材料模量 E_2 , 分别达到变化典型参数模量比 E_2/E_1 和厚度比 T_2/T_1 的目的, 而双层压杆的总厚度不变。

图 7(a)和图 7(b)所示, 临界屈曲载荷随厚度比增加而减小, 这与临界屈曲载荷随长细比增加而减小的规律保持一致。同时, 能耗也随厚度比增加而降低。可以发现, 双层压杆中金属层对能耗性能起着主要作用。另外对于不同模量比 E_2/E_1 , 如图 7(c)和图 7(b)所示。临界屈曲载荷和耗散能量均与模量比呈正相关。结合式(1)双层梁抗弯刚度分析, 柔性结构厚度和弹性模量变化起到移动弯曲中性轴的作用, 可灵活调整双层压杆弯曲刚度的作用, 进而改变双层压杆的承载和能耗性能。因此, 改变柔性结构的厚度和材料属性可以实现双层压杆承载与耗散性能的灵活调整。

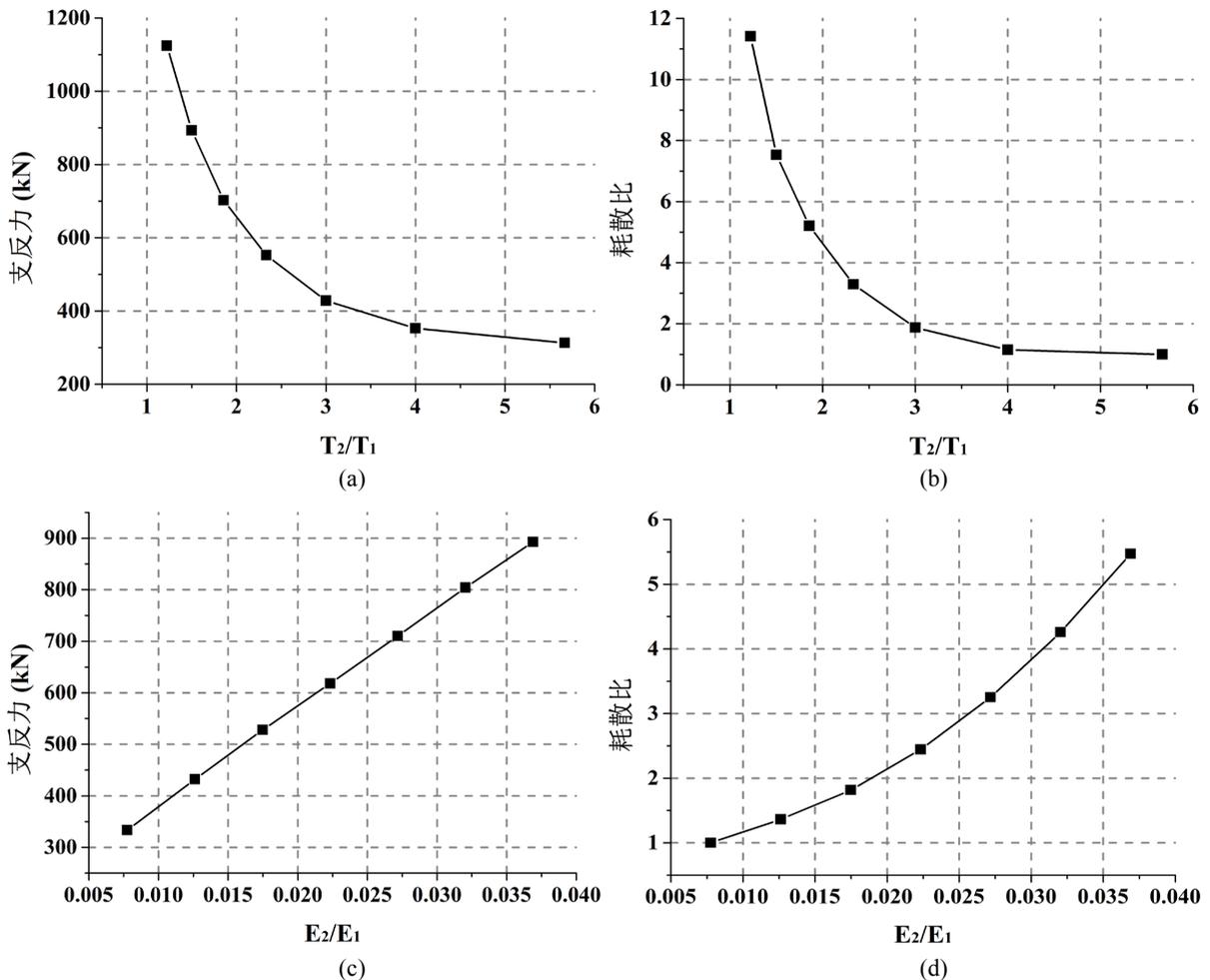


Figure 7. The effect of structural parameters on critical buckling load and energy dissipation; (a) Relation between critical buckling load and thickness ratio; (b) Relation between ratio of energy consumption and thickness ratio; (c) Relation between critical buckling load and ratio of elastic modulus; (d) Relation between ratio of energy consumption and ratio of elastic modulus
图 7. 结构参数对临界屈曲载荷和能耗性能的影响; (a) 临界屈曲载荷与厚度比关系; (b) 耗散比与厚度比关系; (c) 临界屈曲载荷与模量比关系; (d) 耗散比与模量比关系

2.4. 刚度 - 阻尼图谱

在工程应用中, 提高结构刚度和阻尼综合水准成为业界共识。材料阻尼理论[7]中, 利用代表刚度的特定弹性模量(E^*)和表征阻尼的相位角正切($\tan \phi$)的乘积, 判定材料的弹性模量和阻尼的综合性能。图 8 呈现了多种材料的弹性模量和阻尼特征。其中, 斜线($|E^* \tan \phi = 0.6 \text{ GPa}$)的右上侧表示这一指标的最优区域。双层压杆激励 - 响应曲线为非线性特征, 则阻尼 $\tan \phi$ 采用回环面积与椭圆($\phi = 1 \text{ rad}$)面积之比表

示。而有效刚度为将滞后回环一分为二的斜线斜率。图 3(b)中双层压杆力-位移曲线中各参数去除结构尺寸的影响,可得出应力-应变滞后曲线。为方便说明,可将此应力-应变曲线视为某种材料在外力下产生的滞后回环。经计算得出,特定弹性模量 $E^* \approx 112 \text{ GPa}$, 且阻尼参数 $\tan \phi \approx 0.51$, $|E^* \tan \phi| \approx 57 \text{ GPa}$ 远远大于较优标准值 0.6 GPa 。图 8 中红色实心五角星为该滞后回环的 $|E^* \tan \phi| \approx 57 \text{ GPa}$ 所在位置。由此可以判断,一定结构参数的双层压杆在循环荷载下的稳态转换可实现高刚度兼顾高阻尼特征。

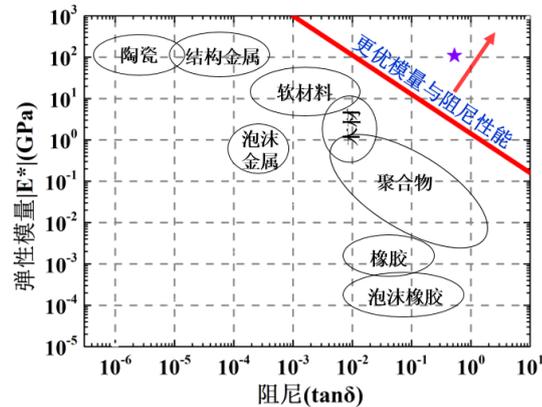


Figure 8. Stiffness-damping map of material
图 8. 材料刚度-阻尼图谱

3. 砰击载荷下导管架平台振动衰减分析

本文选取三维导管架平台作为研究对象[14]。首先,建立一个五层的传统弹塑性导管架(表 3 中 Model 1),作为基准结构。详细的几何参数如下:每层高 10 m ; 桩腿的内外径分别为 1.2 m 和 1.1 m ; 横撑内外径分别为 0.56 m 和 0.5 m , 长度为 10 m ; 斜撑为实心结构,横截面积为 0.03 m^2 。导管架结构材料均采用 Q235 钢(弹性模量: 210 GPa ; 泊松比: 0.3 ; 屈服强度: 235 MPa)。导管架结构($5.63 \times 10^5 \text{ kg}$)和上部组块($2.44 \times 10^6 \text{ kg}$)质量分别分布于连接节点和导管架顶部。桩腿底部泥面以下进行固定约束。为直观评估滞后撑杆结构耗散性能,本文不考虑 Model 1 的结构阻尼。桩腿和横撑均采用 B31 单元,而将斜撑视为二力杆,利用三维 2 节点杆单元(T3D2)进行离散。根据波浪砰击试验[14],在导管架第四层施加幅值为 $1.5 \times 10^6 \text{ N}$ 的砰击载荷(图 10(a))。

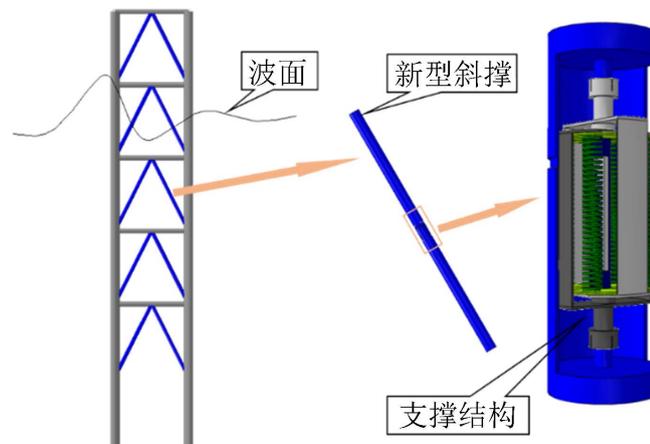


Figure 9. Jacket platform and diagonal brace with bilayered column
图 9. 导管架平台及嵌入双层压杆结构的斜撑

Table 3. Jacket platform model
表 3. 导管架平台模型

模型	导管架结构		
	桩腿	横撑	斜撑
Model1	弹塑性	弹塑性	弹塑性
Model2	弹塑性	弹塑性	双层压杆

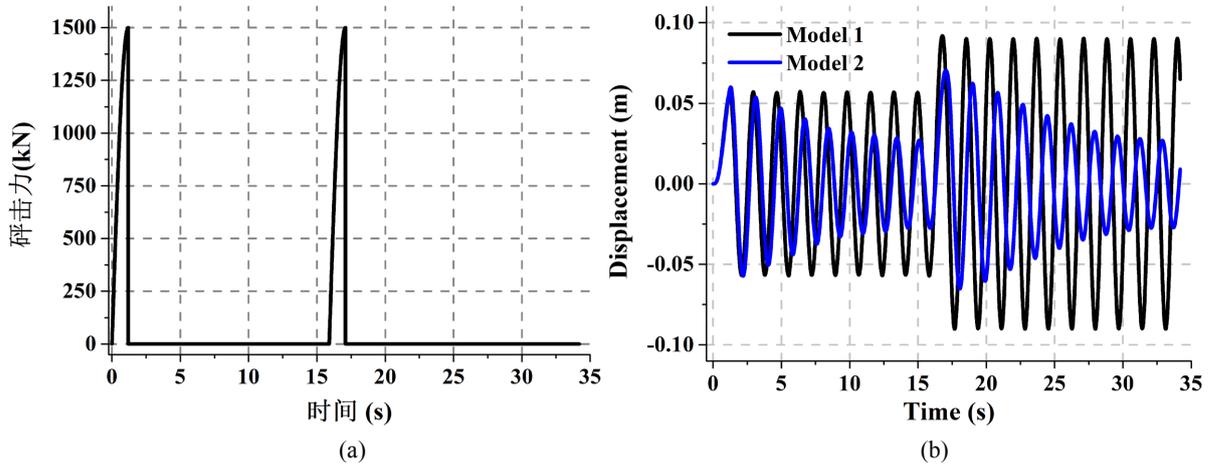


Figure 10. Slamming load and vibration attenuation process of jacket platform; (a) The time history curves of wave impact load (1.5×10^6 N); (b) The free vibration attenuation curve of jacket

图 10. 导管架平台所受砰击载荷及振动衰减过程; (a) 波浪砰击荷载(1.5×10^6 N)时程曲线; (b) 导管架的自由振动衰减曲线

图 10(b)为导管架顶部上部组块集中质量处位移时程曲线。在第一次砰击作用后，导管架自由振动的频率为 0.585 Hz，与 Model 1 基频相同。在第二次砰击后，振幅大幅提高，而桩腿泥面处的 Mises 应力接近材料屈服强度，如图 11(a)所示。结合上述结果，连续的砰击作用导致导管架结构动能持续累加，极易产生强度问题。因此，需要高阻尼结构高效的耗散平台的累计砰击动能。

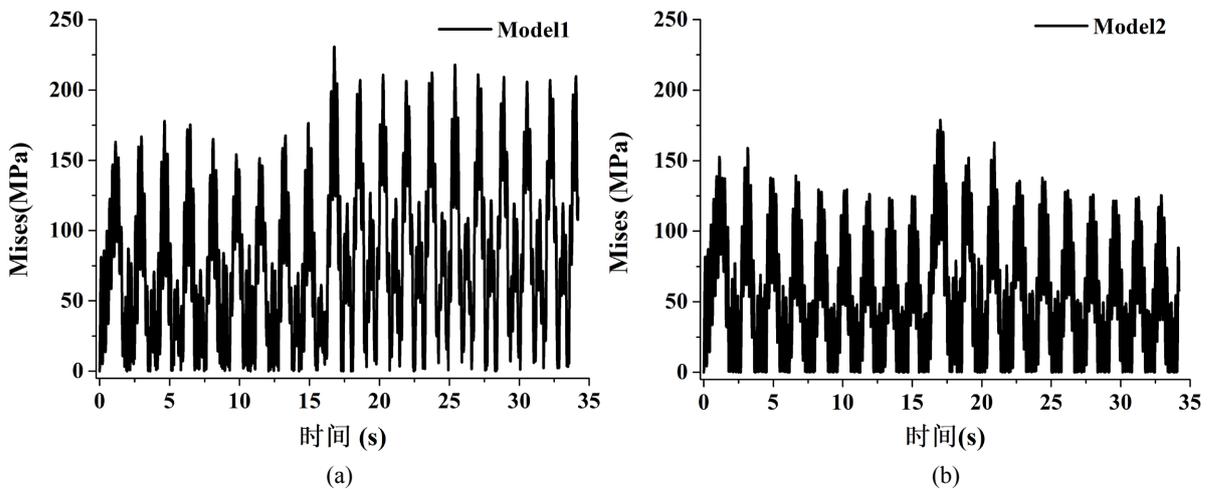


Figure 11. The stress time history curve at the strength hazard structure of jacket platform; (a) Structural maximum stress time history curve (Model 1); (b) Structural maximum stress time history curve (Model 2)

图 11. 导管架平台强度危险结构处的应力时程曲线; (a) 结构最大应力时程曲线(Model 1); (b) 结构最大应力时程曲线(Model 2)

基于 Model 1 导管架结构, 具有能耗特性的撑杆替换原导管架中的斜撑, 且每根撑杆内部装配一根多稳态双层压杆。组装的新型导管架模型视为 Model 2 (表 3)。考虑到实际结构工程应用, 本撑杆由能耗构件、连接件和封装件组成, 如图 9 所示。基于参数特性分析结果, 开展双层压杆结构优化设计, 保证撑杆高刚度高阻尼属性。表 1 为优化所得压杆结构参数。为提高计算效率和保证结果精度, 本节利用 T3D2 单元离散的直杆, 赋予自定义的材料属性(UMAT), 实现与本节提出的新型撑杆相同的力 - 位移响应特征。图 3(c)展示出自定义材料的直杆的刚度和回环与实际结构基本重合。此直杆长度和横截面积分别为 11.18 m 和 0.0416 m^2 。Model 2 的基频为 0.58 Hz, 因此 Model 1 与 Model 2 初刚度相近。图 9 为波浪对导管架平台的砰击作用示意图。根据图 10(b)中位移时程曲线, Model 2 的初始幅值与 Model 1 接近, 但振幅产生快速衰减。在强度方面, Model 1 导管架产生接近塑性损伤的构件, 而 Model 2 导管架 Model 2 中最大应力(图 11(b))一直处于屈服强度以下。在导管架自由振动中, 波浪砰击的动能转化为导管架动能并引起双层压杆势能变化。双层压杆在导管架的往复振动中持续耗散动能, 快速降低了导管架平台的振幅。

1) 循环载荷下, 双层压杆稳态变化, 其刚度进行退化和恢复的循环过程, 进而形成激励 - 响应滞回曲线, 实现高耗能特性。

2) 柔性结构通过控制双层压杆弯曲中性轴位置, 进而调控双层压杆抗弯刚度和滞后阻尼特性。

3) 金属结构对双层压杆力学性能起主导作用, 而两种材料的厚度分配和材料性能可对双层压杆的承载和滞后阻尼性能进行大范围调控。

4) 双层压杆的导管架振动衰减速率远快于传统结构。同时, 结构中的应力极值始终低于传统结构。双层压杆为导管架平台带来优异的阻尼性能。

致 谢

感谢项目主持人方辉对本研究提供的资金支持与方向指导; 感谢本文其他合作作者对本人论文撰写的帮助; 感谢振动控制论文发表着对本人研究创作与创新的启发。

基金项目

本文依托于国家自然科学基金项目(51979258)和山东省重大创新工程项目(2019JZZY010301), 对振动控制理论和减振器进行创新性开发。

参考文献

- [1] Thomas, G., Davis, M., Holloway, D. and Roberts, T. (2008) The Vibratory Damping of Large High-Speed Catamarans. *Marine Structures*, **21**, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.12.003>
- [2] 郭芳, 刘屿, 赵志甲, 罗飞, 邬依林. 耦合内流动力学的海洋柔性立管振动控制[J]. 振动与冲击, 2017, 36(21): 157-162.
- [3] 杨俊, 王刚伟, 田佳彬, 刘正林. 船舶推进轴系振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10): 63-67.
- [4] Kandasamy, R., Cui, F., Townsend, N., et al. (2016) A Review of Vibration Control Methods for Marine Offshore Structures. *Ocean Engineering*, **127**, 279-297. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.10.001>
- [5] 王民, 李凤蛟, 咎涛, 高相胜. 基于多重调谐质量阻尼器的滚珠丝杠副横向振动控制[J]. 振动与冲击, 2015, 34(10): 63-67.
- [6] 倪振华. 振动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [7] Lakes, R. (2009) *Viscoelastic Materials*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [8] 李景传, 梁立红, 刘小明. 金属/环氧/金属粘结体系的强韧和失效机制实验研究[J]. 力学学报, 2017, 49(6): 1213-1222.
- [9] ABAQUS 6.14. Analysis User's Manual. <http://130.149.89.49:2080/v6.14/index.html>
- [10] Timoshenko, S. and Gere, J. (1963) *Theory of Elastic Stability*. McGraw-Hill, New York.

- [11] Barbarino, S., Pontecorvo, M. and Gandhi, F. (2012) Energy Dissipation of a Bi-Stable von Mises Truss under Harmonic Excitation. *Proceedings of 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Boston, Massachusetts, April 8-11 2013. <https://doi.org/10.2514/6.2013-1794>
- [12] Chuang, T. and Lee, S. (2000) Elastic Flexure of Bilayered Beams Subject to Strain Differentials. *Journal of Materials Research*, **15**, 2780-2788. <https://doi.org/10.1557/JMR.2000.0397>
- [13] 周绪红. 结构稳定理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [14] Sruthi, C. and Sriram, V. (2017) Wave Shock Load on Jacket Structure in Intermediate Water Depth. *Ocean Engineering*, **140**, 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.023>