

新型准零刚度果蔬运输隔振系统设计

铁世萃¹, 王花兰²

(1.青海交通职业技术学院, 西宁 810000; 2.兰州交通大学, 兰州 730070)

摘要: **目的** 为避免果蔬在运输过程中因振动造成损伤, 导致价值下降, 基于准零刚度隔振技术, 提出一种采用紧凑、高效的弹簧-滚轮-滚珠负刚度机构的新型果蔬运输隔振箱装置。**方法** 首先, 基于弹簧-滚轮-滚珠负刚度机构与垂向正刚度弹簧并联的方式设计准零刚度果蔬运输隔振系统结构; 其次, 分析其静力学特性, 推导该非线性隔振装置的刚度特性; 最后, 在果蔬运输系统模型运动微分方程基础上建立 Simulink 仿真模型, 研究在 C 级路面激励下, 该新型运输隔振系统的动态隔振特性。**结果** 研究表明, 通过合理的结构参数设计, 该隔振装置在平衡点附近将具有高静态刚度、低动态刚度的准零刚度特性。在 C 级路面激励下, 该新型运输隔振系统的振动位移峰的峰值相较于对应线性系统的衰减约 29.3%, 加速度均方根值衰减约 97.3%。**结论** 设计合理的新型果蔬运输系统的隔振效率优于对应的线性隔振系统的。

关键词: 果蔬运输; 准零刚度; 隔振设计; 非线性

中图分类号: TB485.3; TH113.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)17-0102-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.013

Design of a New Quasi-zero Stiffness Vibration Isolation System for Fruit and Vegetable Transportation

TIE Shi-cui¹, WANG Hua-lan²

(1. Qinghai Communications Technical College, Xining 810000, China;

2. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a new fruit and vegetable transportation vibration isolation box device with compact and efficient spring-roller-ball negative stiffness mechanism based on the quasi-zero stiffness vibration isolation technology, so as to avoid the damage and value decline caused by vibration in fruit and vegetable transportation. Firstly, the structure of vibration isolation system of quasi-zero stiffness for fruit and vegetable transportation was designed based on the parallel connection of spring-roller-ball negative stiffness mechanism and vertical positive stiffness spring; Secondly, the static characteristics were analyzed, and the stiffness characteristics of the nonlinear vibration isolation device were deduced; Finally, based on the motion differential equation of the fruit and vegetable transportation system model, a Simulink simulation model was established to study the dynamic vibration isolation characteristics of the new transportation vibration isolation system under level-C road excitation. The research results showed that the vibration isolation device may have the quasi-zero stiffness with high static stiffness and low dynamic stiffness near the balance point through reasonable design of structure parameters. Compared with the corresponding linear system, the peak to peak value of vibration displacement and the RMS value of acceleration of the new transportation vibration isolation system decreased by 29.3% and 97.3% respectively under level-C road excitation. The vibration isolation efficiency of the new fruit and vegetable

收稿日期: 2021-10-31

基金项目: 中国物流学会研究课题 (2021CSLKT3-158)

作者简介: 铁世萃 (1985—), 女, 本科, 讲师, 主要研究方向为物流运输。

通信作者: 王花兰 (1969—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为城市交通、物流运输。

transportation system with reasonable design is superior to that of the corresponding linear vibration isolation system.

KEY WORDS: fruit and vegetable transportation; quasi-zero stiffness; vibration isolation design; nonlinearity

果蔬类农产品在农村经济中占有重要地位, 是乡村产业结构调整 and 我国实施乡村振兴战略的重要环节^[1-2]。果蔬类农产品的流通必然需要物流运输, 而物流运输过程中长时间的振动是导致果蔬机械损伤的重要原因, 我国每年有大量的水果和蔬菜由于机械损伤而导致价值降低甚至丢弃^[3-5]。高性能的果蔬运输隔振设计具有重要的研究价值和良好的应用前景^[6-7]。

线性隔振装置由于具有结构简单、性能可靠等诸多优点, 被广泛应用于各类隔振实践中。为了实现更高的隔振性能, 必然要求线性隔振装置具有更低的刚度, 然而这也会导致弹性元件的大变形和稳定性下降。准零刚度具有优异的高静态刚度、低动态刚度 (HSLD) 特性, 不仅可以可靠地支撑果蔬等货物, 而且可以实现对小幅振动的高性能隔振, 是一种优良的果蔬运输隔振方案。

准零刚度隔振系统通常是在正刚度机构的基础上并联等大小的负刚度机构获得, 准零刚度系统往往具有很低的动刚度, 从而获得很低的固有频率和起始隔振频率^[8-9]。目前, 准零刚度隔振系统已经广泛应用于飞行器振动测试^[10]、高性能制造^[11-12]、液体输送管^[13]等诸多领域。笔者在之前的研究中采用三弹簧并联的方式实现了准零刚度果蔬运输隔振系统^[14], 然而, 三弹簧并联的准零刚度结构占用的空间较大^[15-16], 不利于准零刚度果蔬运输隔振的广泛应用。为此文中基于弹簧-滚珠-滚珠负刚度机构与正刚度并联的结构开展改进设计, 提出一种新型、紧凑的准零刚度果蔬运输隔振系统。

1 准零刚度隔振装置结构设计

文中提出的采用正负刚度并联结构实现的新型准

零刚度果蔬运输隔振装置见图 1a。其中, 果蔬负载质量记为 m_0 , 正刚度主要由刚度为 K_1 、阻尼系数为 C_1 的竖直弹簧提供, 负刚度机构是装置实现高性能隔振的关键, 采用的弹簧-滚珠-凸轮负刚度机构的弹簧刚度和预压缩量分别记为 K_0 和 μ 、滚珠半径记为 r_0 、凸轮半径记为 r_1 。相比三弹簧、欧拉压杆等负刚度机构, 弹簧-滚珠-凸轮负刚度机构具有结构紧凑、效率高、对小位移敏感等诸多优点, 能适用于车载装置的高性能隔振。通过合理的参数配置, 弹簧-滚珠-凸轮结构将在平衡位置附近表现为与正刚度近似相抵的负刚度特性, 即隔振装置将在平衡位置附近表现为高静态刚度、低动态刚度特性, 从而在可靠支撑果蔬负载的前提下实现优异的隔振性能, 避免果蔬在运输过程中的损伤。

为了研究该新型准零刚度果蔬运输隔振装置的动态隔振性能, 结合汽车系统动力学与控制领域经典的四分之一车辆悬架模型^[17-18]提出了如图 1b 所示的新型果蔬运输车模型。其中, 车身、轮胎质量分别为 m_1 、 m_2 , 悬架、轮胎刚度分别为 K_2 、 K_3 , 悬架阻尼系数为 C_2 。图 1b 所示, 果蔬运输隔振装置安装在车身上。果蔬车架的位移、车身的位移、车轮的位移、路面的激励位移分别记为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 。

2 准零刚度隔振装置的静力学分析

2.1 力-位移关系

令果蔬车架位移 X_1 与车身位移 X_2 的相对位移为 $X_{12}=X_1-X_2$, 通过图 1a 可以看到, 准零刚度隔振装置的恢复力 F_{12} 与 X_{12} 有以下的分段非线性关系:

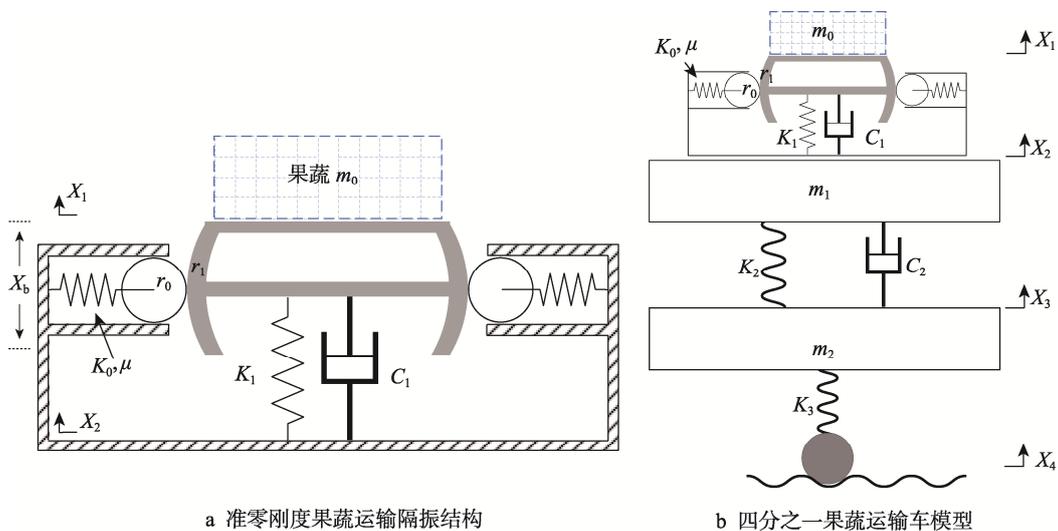


图 1 新型准零刚度果蔬运输隔振系统简图

Fig.1 Structural diagram of new fruit and vegetable transportation vibration isolation system with quasi-zero stiffness.

$$F_{12}(X_{12}) = \begin{cases} K_1 X_{12} - 2K_0 X_{12} \left[1 + \frac{\lambda - (r_0 + r_1)}{\sqrt{(r_0 + r_1)^2 - X_{12}^2}} \right] & |X_b| \leq X_{12} \\ K_1 X_{12} & |X_b| > X_{12} \end{cases} \quad (1)$$

式中： X_b 为滚轮 r_0 与凸轮 r_1 脱离的临界位移，考虑到小幅振动时，滚轮与凸轮一直保持接触，以下研究中不再考虑 $|X_b| > X_{12}$ 的情况。

为了更加方便直观地表达 F_{12} 与结构参数之间的关系，以及寻找结构参数与系统静力学的关系，对 F_{12} 在 $X = 0$ 附近作三阶泰勒级数展开：

$$F_{12}(X) = \alpha X_{12} + \frac{1}{3} \gamma X_{12}^3 + o(X_{12}^5) \quad (2)$$

$$\alpha = K_1 - 2K_0 \frac{\mu}{r_0 + r_1}, \gamma = 3K_0 \frac{\mu - (r_0 + r_1)}{(r_0 + r_1)^3}$$

根据式(3)，对于特定的准零刚度隔振系统结构参数，竖直弹簧的刚度 K_1 、负刚度机构弹簧的刚度 K_0 、滚珠半径 r_0 、凸轮半径 r_1 都是常数，预压缩量 λ 将是影响隔振系统刚度特性的关键参数。令 α 在平衡点 $X_{12} = 0$ 处为 0，即 $d_\alpha/dX_{12}(X_{12} = 0) = 0$ ，可得准零刚度条件：

$$\hat{\mu} = \frac{K_1}{2K_0} (r_0 + r_1) \quad (3)$$

结合式(2)、式(3)和图2可以看到，随着水平弹簧的初始预压缩量 μ 从 0开始逐渐增加，隔振系统在平衡位置附近的刚度逐渐减小(图2中实线、虚线所示)；当预压缩量 μ 增加到 $\hat{\mu} = 0.18$ m，隔振系统将达到准零刚度状态(图2中点虚线所示)；若预压缩量 μ 继续增加，其在平衡位置 $X = 0$ 附近的刚度将继续减小为负刚度(图2中点线所示)。准零刚度果蔬运输隔振装置的结构参数及默认值见表1。

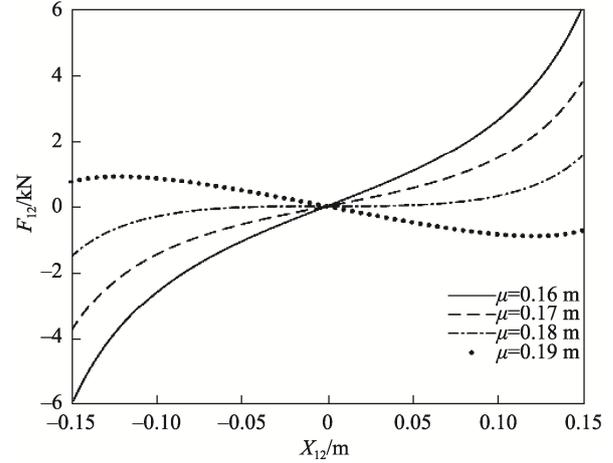


图2 不同预压缩量下的力-位移关系
Fig.2 Force-displacement relationship under different pre-deformation

2.2 准零刚度隔振装置的刚度特性

根据式(2)可将果蔬车架的刚度 K_{12} 描述为：

$$K_{12} = \frac{dF_{12}}{dX_{12}} = \alpha + \gamma X_{12}^2 \quad (4)$$

通过图3可见，当 $\mu = \hat{\mu} = 0.18$ m时，隔振系统在平衡位置 $X_{12} = 0$ 附近具有接近于 0的刚度，且总是大于等于 0，从而令系统在小幅振动时具有优异的隔振性能。结合图3和式(7)可以看到，当 $\mu < \hat{\mu}$ 时，隔振装置总是表现为正的刚度，且随着 μ 逐渐减小，系统刚度 K_{12} 逐渐增大，意味着隔振装置的隔振性能逐渐恶化；当 $\mu > \hat{\mu}$ 时，隔振装置在平衡位置 $X_{12} = 0$ 附近出现负刚度，系统将不稳定，因此文中主要讨论隔振装置达到准零刚度，即 $\mu = \hat{\mu}$ 的情形。

表1 几何非线性果蔬运输隔振装置结构参数
Tab.1 Structural parameters of the vibration isolation device for fruit and vegetable transportation with geometric nonlinearity

参数	含义	单位	默认值
m_0	果蔬车厢质量	kg	500
K_0	负刚度机构的弹簧刚度	N/mm	100
K_1	竖直弹簧刚度	N/mm	180
C_1	竖直弹簧的阻尼系数	N·s/m	800
μ	负刚度机构弹簧的预压缩量	m	0.18
r_0	负刚度机构滚轮的半径	m	0.04
r_1	凸轮的半径	m	0.16

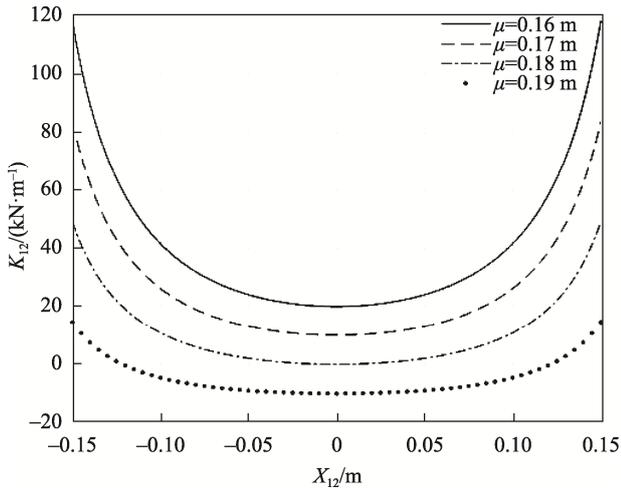


图 3 不同预压缩量下的刚度-位移关系
Fig.3 Stiffness-displacement relationship under different pre-deformation

当隔振系统在平衡位置附近时, 由于 X_{12} 很小, 由式 (7) 可知 $K_{12} \approx 0$, 故隔振系统将在平衡位置附近表现为近零刚度。当隔振系统逐渐远离平衡位置时, 由式 (7) 可见, 系统刚度 $K_{12} = \gamma X_{12}^2$ 快速增大, 故隔振系统表现为高的静态刚度, 即该隔振系统具有高静态刚度、低动态刚度的特性。

3 果蔬运输车建模与动力学分析

3.1 基于 Simulink 的果蔬运输车的动力学建模

根据图 1a 和式 (1) 建立准零刚度隔振装置的 Simulink 模型, 见图 4。

在图 4 中, 当水平弹簧的刚度 $K_0=0$ 时, 该模型退化为对应的线性果蔬运输车模型。

根据图 1b 和第 2 节的分析, 具有准零刚度果蔬运输车四分之一车模型的动力学方程可以描述为:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{X}_1 + C_1 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + F_{12} (X_1 - X_2) = 0 \\ M_2 \ddot{X}_2 + C_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_3) + K_2 (X_2 - X_3) - \\ C_1 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - F_{12} (X_1 - X_2) = 0 \\ M_3 \ddot{X}_3 + K_3 (X_3 - X_4) - C_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_3) - \\ K_2 (X_2 - X_3) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据式 (8) 建立准零刚度果蔬运输车的仿真模型, 见图 5。

理论研究中, 连续不均匀的路面一般是分级的。1986 年, 由长春汽车研究所起草制定的《车辆振动输入-路面不平度的表示方法》标准中^[19], 按照道路从好到坏的程度, 将典型路面划分为 A、B、C、D、E、F、G、H 等 8 个等级, 其中 B 级或 C 级路面是国内常见的交通路面。滤波白噪声法是采用较多的道路不平度模拟方法, 滤波白噪声路面不平度模型 $X_4(t)$ 的表达式见式 (6)。

$$X_4(t) = -2\pi n_1 u X_4(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} u \omega(t) \quad (6)$$

式中: $\omega(t)$ 为单位强度的高斯白噪声; u 为行驶车速; n_0 为参考空间频率; 通常取 0.1 m^{-1} , n_1 为下载至空间频率, 其值为 0.01 m^{-1} 。根据路面不平度 8 级分级标准, B 级、C 级路面的功率谱密度 $G_q(0.1)$ 分别为 64×10^{-6} 、 $256 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。图 6 为滤波白噪声路面不平度的 Simulink 模型。

3.2 准零刚度果蔬运输车的隔振特性研究

图 7 为 C 级路面激励及果蔬车架 M_0 的振动位移 X_1 和加速度响应 \ddot{X}_1 。图 7a 为 C 级路面激励及果蔬车架 M_0 的振动位移响应, 可以看到, 具有准零刚度 (QZS) 隔振装置的系统可以极大地衰减来自路面的振动, 其波动幅度和频率相较于对应的线性系统都有显著的降低。在 C 级路面激励下, 具有不同隔振装置的果蔬运输车的振动响应对比见表 2。通过表 2 可以看到, 准零刚度系统的振动位移波动要显著小于对应的线性系统的, 其均方根值、峰峰值分别约衰减了 21.2%、29.3%。

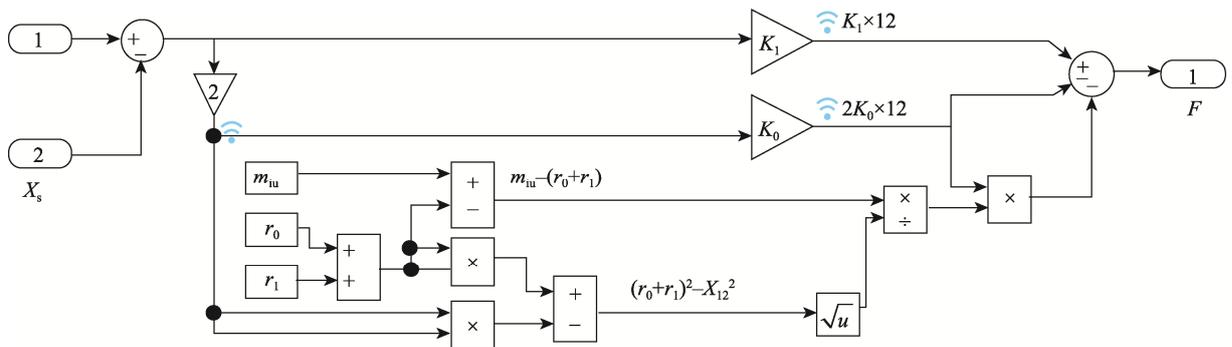


图 4 准零刚度隔振装置的 Simulink 模型
Fig.4 Simulink model of quasi-zero stiffness vibration isolation device

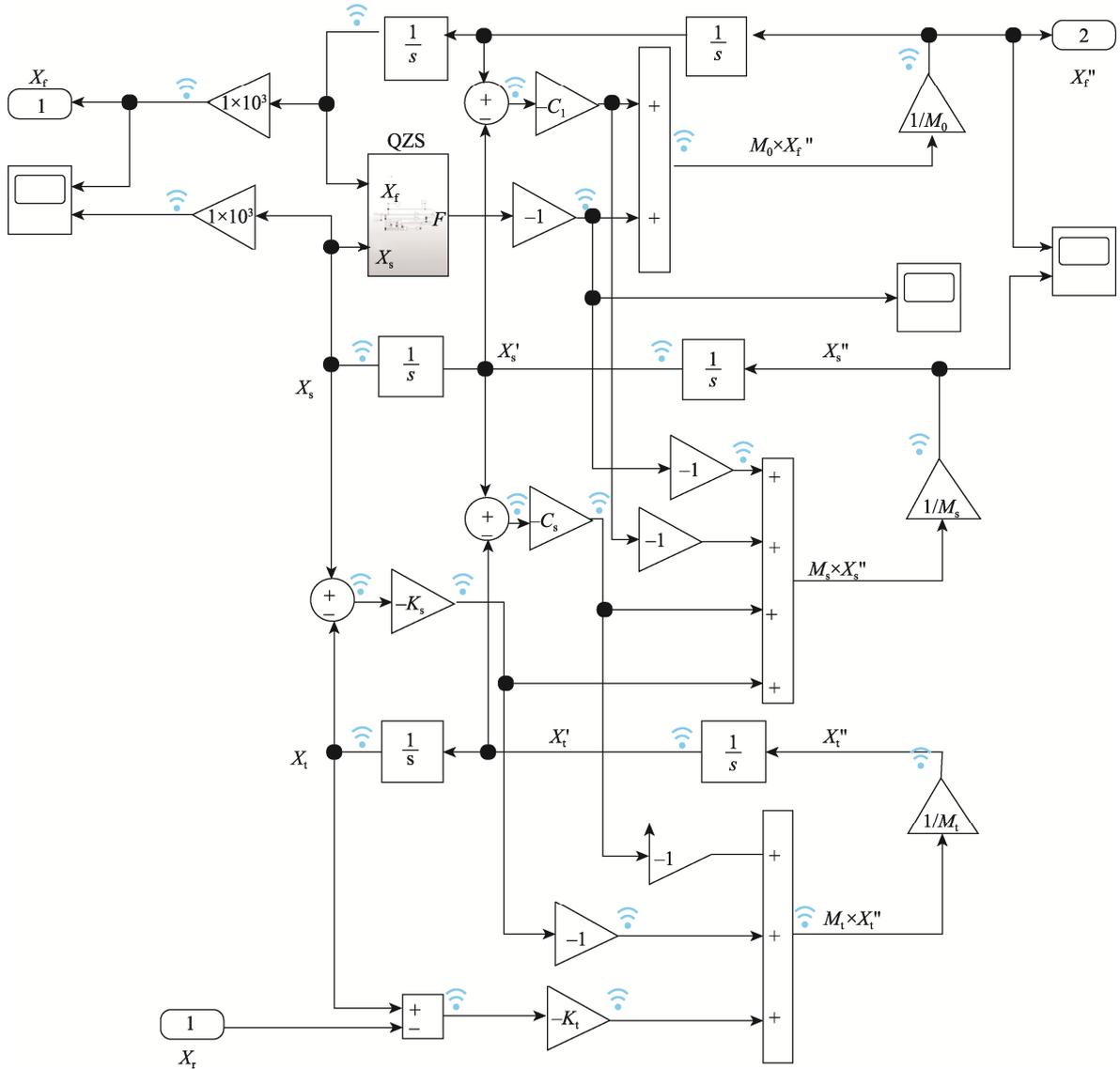


图5 准零刚度果蔬运输车的 Simulink 模型

Fig.5 Simulink model of quasi-zero stiffness fruit and vegetable transport vehicle

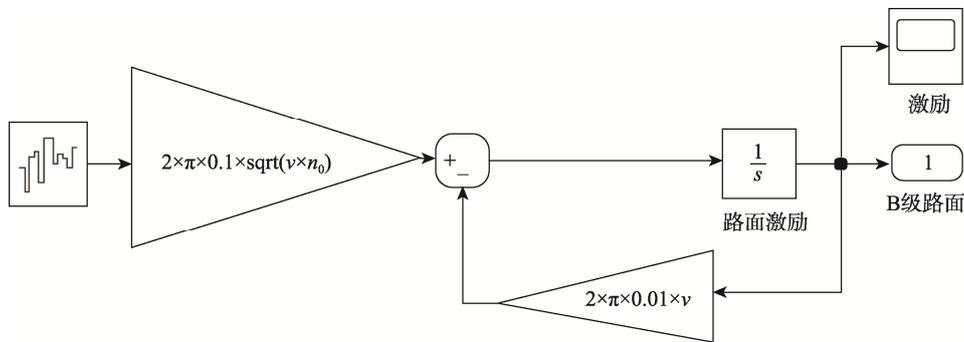


图6 滤波白噪声路面不平度模型

Fig.6 Road roughness model with filtered white noise

果蔬车架 M_0 的振动加速度响应见图 7b。由图 7b 可知，具有准零刚度（QZS）隔振装置的系统具有更优的振动衰减效果，其振动幅值和频率较对应的线性系统

的都有大幅度的降低。通过表 2 的对比可以看到，准零刚度系统的振动加速度信号要显著的小于对应的线性系统的，其均方根值、峰峰值分别约衰减了 97.3%、85.5%。

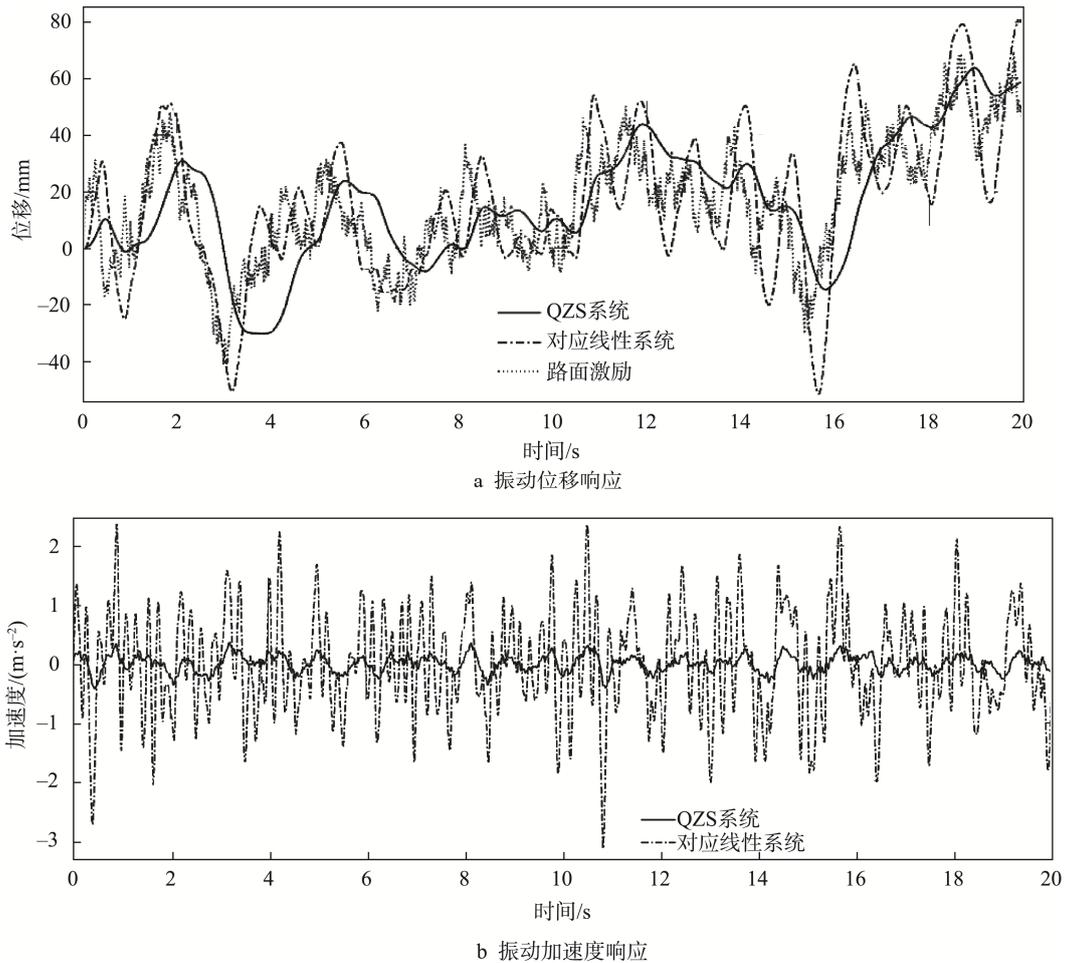


图 7 C 级路面激励下果蔬车架的振动响应
Fig.7 Vibration response of fruit and vegetable vehicle frame at level-C road excitation

表 2 采用不同隔振装置的果蔬运输车的振动响应对比

Tab.2 Comparison of vibration response of fruit and vegetable transport vehicle with different vibration isolation devices

不同隔振系统	位移响应/mm		加速度响应/(m·s ⁻²)	
	均方根值	响应峰峰值	均方根值	响应峰峰值
准零刚度系统	734.6	94.2	1.98×10 ⁻²	0.795
对应线性系统	932.7	133.3	0.745	5.50

4 结语

文中提出了一种基于弹簧-滚轮-滚珠负刚度机构的新型紧凑、高效的果蔬运输隔振系统。对隔振系统的刚度分析表明,该结构的刚度与振动位移是典型非线性关系,通过合理地设计结构参数,该装置在平衡位置附近表现为高静态刚度、低动态刚度的准零刚度特性。在推导果蔬运输车四分之一车模型微分方程的基础上,采用 Simulink 建立了新型果蔬运输隔振系统模型,研究了在 C 级路面激励下,该新型运输隔振系统的动态隔振特性。仿真分析结果表明,对于 C

级路面激励,该新型果蔬运输车在全频段大幅优于对应的线性运输系统,其振动位移响应峰峰值、均方根值均显著小于对应的线性运输系统的,其加速度响应的峰峰值、均方根值更是大幅度小于对应的线性运输系统的。

参考文献:

[1] 范蕊. 长春国爱农场有机果蔬营销策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 6-42.
FAN Rui. Research on Marketing Strategy of Organic Fruits and Vegetables in Changchun Guoai Farm[D].

- Changchun: Jilin University, 2020: 6-42.
- [2] 杨杰, 王灵玲, 鲁雨轩. 我国果蔬产业冷链物流运输研究[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(4): 80-81.
YANG Jie, WANG Ling-ling, LU Yu-Xuan. Research on Cold Chain Logistics Transportation of Fruit and Vegetable Industry in China[J]. Grain technology and economy, 2020, 45(4): 80-81.
- [3] 周然, 苏树强, 李云飞. 果蔬运输振动频谱检测分析及对水果损伤的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(10): 76-79.
ZHOU Ran, SU Shu-qiang, LI Yun-fei. Analysis of Truck Vibration and Damage to Huanghua Pears during Transport[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 76-79.
- [4] 李光, 王子蕊, 宋海燕. 苹果运输包装振动损伤预测方法的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 251-256.
LI Guang, WANG Zi-rui, SONG Hai-yan. Prediction of Vibration Damage of Apples in Transportation Package[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 251-256.
- [5] 昌玥, 范佳雯, 卢文静, 等. 猕猴桃减振包装在模拟运输中的使用效果[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(5): 14-19.
CHANG Yue, FAN Jia-wen, LU Wen-jing, et al. Effects of Anti-Vibration Package in Simulated Transportation of Kiwifruit[J]. Storage and Process, 2017, 17(5): 14-19.
- [6] 王芳, 魏星, 魏巍, 等. 果蔬运输受振动·冲击作用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(26): 326-329.
WANG Fang, WEI Xing, WEI Wei, et al. Research Progress on Transport Vibration and Impact Damage of Fruit and Vegetable[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(26): 326-329.
- [7] 赵芸, 马少博, 胡云峰, 等. 运输过程中振动对蔬菜品质的影响[J]. 天津农业科学, 2018, 24(5): 75-79.
ZHAO Yun, MA Shao-bo, HU Yun-feng, et al. Effect of Vibration during Transportation on the Quality of Vegetables[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2018, 24(5): 75-79.
- [8] 孟令帅. 新型准零刚度隔振器的设计和特性研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2015: 2-18.
MENG Ling-shuai. Design and Characteristics Analysis of the Novel Quasi-Zero Stiffness Isolator[D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, 2015: 2-18.
- [9] VIRGIN L, SANTILLAN S, PLAUT R. Vibration Isolation Using Extreme Geometric Nonlinearity[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 315(3): 721-731.
- [10] MOLYNEUX W. The Support of an Aircraft for Ground Resonance Tests: A Survey of Available Methods[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1958, 30(6): 160-166.
- [11] ZHU Tao, CAZZOLATO B, ROBERTSON W S P, et al. Vibration Isolation Using Six Degree-of-Freedom Quasi-Zero Stiffness Magnetic Levitation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 358: 48-73.
- [12] 王亚威. 基于非线性准零刚度的精密机床隔振器性能研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017: 2-32.
WANG Ya-wei. Study on Performance of Precision Machine Tool Vibration Isolator Based on Nonlinear Quasi-Zero Stiffness[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017: 2-32.
- [13] DING Hu, JI Jin-chen, CHEN Li-qun. Nonlinear Vibration Isolation for Fluid-Conveying Pipes Using Quasi-Zero Stiffness Characteristics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 675-688.
- [14] 应玉萍, 王花兰. 基于几何非线性的果蔬运输隔振系统设计[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 153-158.
YING Yu-ping, WANG Hua-lan. Design of Vibration Isolation System for Fruit and Vegetable Transportation Based on Geometric Nonlinearity[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(19): 153-158.
- [15] 王心龙. CRSM 准零刚度隔振器的非线性隔振特性及实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 3-26.
WANG Xin-long. On Nonlinear Vibration Isolation Characteristics and Experimental Research of a Quasi-Zero-Stiffness Isolator with CRSM[D]. Changsha: Hunan University, 2015: 3-26.
- [16] 妥吉英, 邓兆祥, 张河山, 等. 准零刚度振动传感系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(1): 24-29.
TUO Ji-ying, DENG Zhao-xiang, ZHANG He-shan, et al. Quasi-Zero-Stiffness Vibration Sensor System[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1): 24-29.
- [17] 余志生. 汽车理论[M]. 2版(修订本). 北京: 机械工业出版社, 1990: 230-260.
YU Zhi-sheng. Automobile Theory[M]. Beijing: China Machine Press, 1990: 230-260.
- [18] 张进秋, 黄大山, 姚军. 车辆悬架系统振动控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 38-46.
ZHANG Jin-qiu, HUANG Da-shan, YAO Jun. Vibration Control of Vehicle Suspension System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 38-46.
- [19] GB 7031—86, 车辆振动输入——路面平度表示方法[S].
GB 7031—86, Vehicle Vibration Input—Expression Method of Road Roughness[S].