

For citation: Cai Hao. Simulation Analysis of Forced Vibration Characteristics of Slender Rods under Periodic Support Excitation // Grand Altai Research & Education — Issue 2 (25)'2025
(DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2025.02) — EDN: <https://elibrary.ru/UNZQUD>

UDK 001.8

SIMULATION ANALYSIS OF FORCED VIBRATION CHARACTERISTICS OF SLENDER RODS UNDER PERIODIC SUPPORT EXCITATION

Cai Hao¹

¹ Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, School of Mechanical Engineering and Automation,
Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China
E-mail: 2166312874@qq.com

Abstract. This article mainly studies the forced vibration characteristics of slender beam members under periodic excitation of the support. Firstly, the research background and significance are introduced, and a summary of the current domestic and international research status is given. Then, based on the foundation of vibration theory, a forced vibration model of slender beam members is established, and numerical simulation analysis is carried out using comsol software. Through the study and analysis of characteristic frequencies, frequency domain, and transient response, the influence of excitation frequency and amplitude on the forced vibration characteristics is explored. Finally, a summary of the entire research is made, and future research directions and prospects are proposed. This study has certain reference value for understanding and predicting the forced vibration characteristics of slender beam members under periodic excitation of the support.

Keywords: Forced vibration; Periodic excitation; Natural frequency; Transient response

支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性仿真分析

蔡豪¹

¹ 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 机械工程与自动化学院, 武汉, 430073
E-mail: 2166312874@qq.com

摘要: 本文主要研究了支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性. 首先介绍了研究背景及意义, 并对国内外相关研究现状进行了总结. 然后基于振动理论基础, 建立了细长杆件的强迫振动模型, 并利用 comsol 软件进行了数值仿真分析. 通过对特征频率、频域和瞬态的研究分析, 探讨了激励频率和激励幅值对强迫振动特性的影响. 最后对整个研究进行了总结, 并提出了未来的研究方向和展望. 本研究对于理解和预测支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性具有一定的参考价值.

关键词: 强迫振动; 周期性激励; 特征频率; 瞬态响应

0 引言

随着现代工程技术的快速发展, 细长杆件在桥梁、高楼、塔架等多种结构中的应用越来越广泛 [1]. 这些结构往往承受着复杂的动力荷载, 其中周期性激励是一种常见的动力作用形式. 因此, 对支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性进行深入研究, 对于确保这些结构的安全运行具有重要意义 [2].

目前, 虽然已有研究从理论和数值模拟的角度探讨了细长杆件的振动特性, 但大多数研究集中在自由振动或简单激励条件下的情况, 对于复杂的周期性激励条件下的强迫振动特性研究相对较少.

本文旨在利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 进行细长杆件的强迫振动特性仿真分析, 探索支座周期性激励频率, 激励幅值等参数对细长杆件强迫振动特性的影响规律. 通过本研究, 可以为工程设计和安全评估提供理论依据和技术支持, 进而提高结构的抗震性能和耐久性, 确保工程结构的安全稳定运行 [3].

1 强迫振动理论

在分析支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性之前, 首先需要建立合适的振动模型. 细长杆件的振动模型可以通过 Euler-Bernoulli 梁理论进行简化 [4]. 该理论假设横截面上任意点的剪切变形与弯曲变形相互独立, 且材料是均质, 各向同性, 线弹性的 [5]. 同时在探讨支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性时, 必须深入理解强迫振动理论. 强迫振动是指当外部作用力或力矩的频率与结构的自然频率相匹配时发生的振动现象, 此时系统的振动幅度会显著增加 [6]. 这种现象可以通过以下基本方程来描述:

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

其中, $F(t)$ 代表作用于杆件上的力, F_0 为力的最大值, ω 为激励频率, ϕ 为初始相位角.

对于细长杆件, 其强迫振动响应可通过以下公式计算:

$$y(t) = Y_0 \cos(\omega t + \phi) + A \cos\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

在这里, Y_0 表示由于外力引起的共振振动幅度, A 为非共振振动的幅度, ϕ 为初始相位角 [7].

支座周期性激励的频率与杆件的自然频率之间可能存在共振, 导致振动幅度显著增加. 因此, 分析不同激励频率下的振动响应成为了一个重要的研究方向. 随着频率比的增加, 共振发生的概率和振动幅度均呈现上升趋势. 这说明在设计 and 施工过程中, 需要尽量避免激励频率与杆件的自然频率相近, 以减少潜在的结构损害风险.

综上所述, 强迫振动理论为我们提供了分析和预测支座周期性激励下细长杆件强迫振动特性的理论基础. 通过合理选择激励频率, 可以有效地控制结构的振动响应, 保证结构的安全稳定.

$$Y(t) = Y_0 e^{i\omega t} + A e^{i(\omega t + \phi)} \quad (3)$$

其中, 3 中 $Y(t)$ 代表杆件在时刻 t 的位移响应, Y_0 和 A 分别为共振和非共振振动的幅度, ϕ 为初始相位角.

2 基于 comsol 软件的有限元分析

在本研究中, 我们使用 Comsol Multiphysics 软件来建立细长杆件的有限元分析模型. 该模型考虑了细长杆件的几何特性, 材料属性以及边界条件等因素. 为了确保仿真结果的准确性, 我们对模型进行了详细的设置和校验.

在构建模型时, 首先需要定义细长杆件的几何形状. 假设杆件的高度 L 为 1m , 截面为圆形, 半径 r 为 0.01 . 接下来, 定义材料属性, 采用的是选择 COMSOL 软件材料库中内置材料结构钢 Structural steel 作为细长杆件的组成材料, 其杨氏模量为 E , 泊松比为 ν . 如图 1 所示这些参数对于计算杆件的自然频率和振动模态至关重要.

属性	变量	值	单位	属性组
☒ 密度	rho	7850[kg...	kg/m³	基本
☒ 杨氏模量	E	E(T)	Pa	杨氏模量和泊松比
☒ 泊松比	nu	nu(T)	1	杨氏模量和泊松比
各向同性结构化损耗因子	eta_s	0.02	1	基本
相对磁导率	mur_i...	1	1	基本
恒压热容	Cp	475[J/(k...	J/(kg·K)	基本
导热系数	k_iso ;...	44.5[W/...	W/(m·...	基本
电导率	sigma...	4.032e6...	S/m	基本
相对介电常数	epsilo...	1	1	基本
热膨胀系数	alpha_...	12.3e-6...	1/K	基本
Murnaghan 三阶弹性模量	l	-3.0e11...	N/m²	Murnaghan

图 1 Comsol 软件结构钢 Structural steel 基本属性
Figure 1. Basic properties of structural steel in Comsol software

表 1 结构钢 Structural steel 基本属性
Table 1. Basic Properties of Structural Steel

参数	值
杆件长度 L	1m
半径 r	0.01m
杨氏模量 E	210 GPa
泊松比 ν	0.3
密度	7850 kg/m^3

紧接着需要确定细长杆件的边界, 简支梁杆件其一端约束垂直位移, 一端自由转动. 在边界条件的设置上, 通常杆件的一端不变, 在支座上则施加周期性激励. 特征频率研究分析是要在系统在无外力作用下计算出细长杆件自由振动时的固有频率, 所以在边界条件中指定位移在各方向上都选择 0 , 如图 2 所示.

需要识别共振频率, 所以建立频域研究分析, 并且扫频, 识别共有频率, 同时改变其边界条件. 选择较细化网格划分来确定时间步长选择, 以确保在保证精度的同时提高计算效率, 最后在 Comsol 中建立模型后, 通过设置相应的物理场和求解器, 可以对细长杆件的强迫振动特性进行数值仿真分析. 通过改变激励频率 ω 和幅度 z_0 可以研究它们对振动特性的影响.

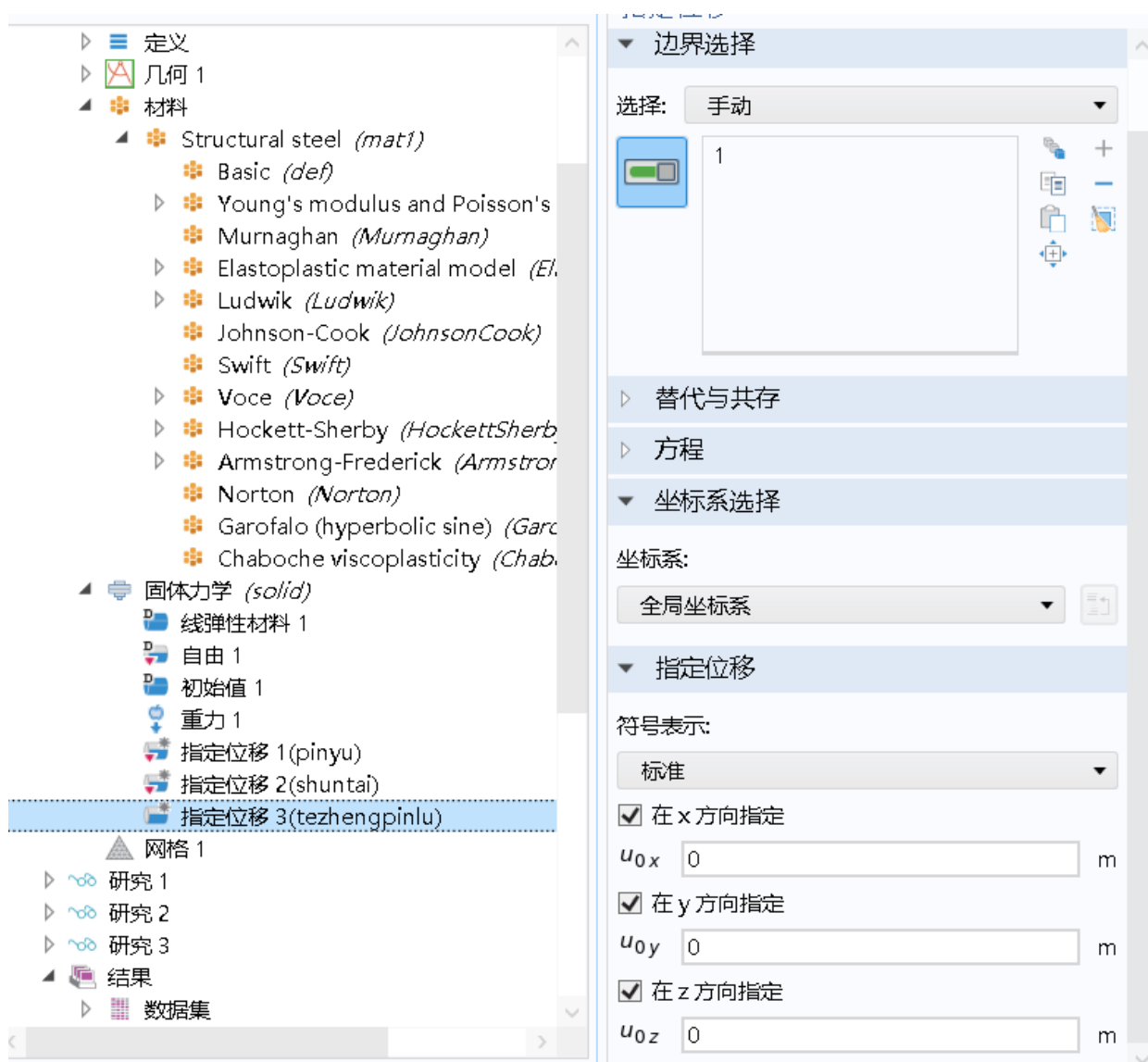


图 2 特征频率研究下边界条件

Figure 2 Study of Feature Frequency Under Boundary Conditions

3 支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性数值仿真参数影响分析

首先, 关注振幅随激励频率的变化情况. 通过精心设计的仿真实验, 并绘制了相应的振幅-频率曲线, 如图 3 所示, 曲线图直观地展示了细长杆件在不同激励频率下的振动响应特性, 可以清晰地观察到, 随着激励频率的逐渐增大, 细长杆件的振幅呈现出先增大后减小的趋势. 这种变化并非线性, 而是存在一个明显的共振峰. 在共振峰附近, 振幅达到最大值, 这意味着在该特定频率下, 细长杆件对外部激励的响应最为强烈.

其次, 频率对振动响应的影响同样不容忽视. 实验结果显示, 在激励频率与细长杆件的固有频率相近时, 振动响应最为剧烈. 这是因为当外部激励与系统的固有频率相匹配时, 系统会发生共振现象, 导致振幅急剧增加. 然而, 随着激励频率的进一步偏离固有频率, 振动响应逐渐减弱.

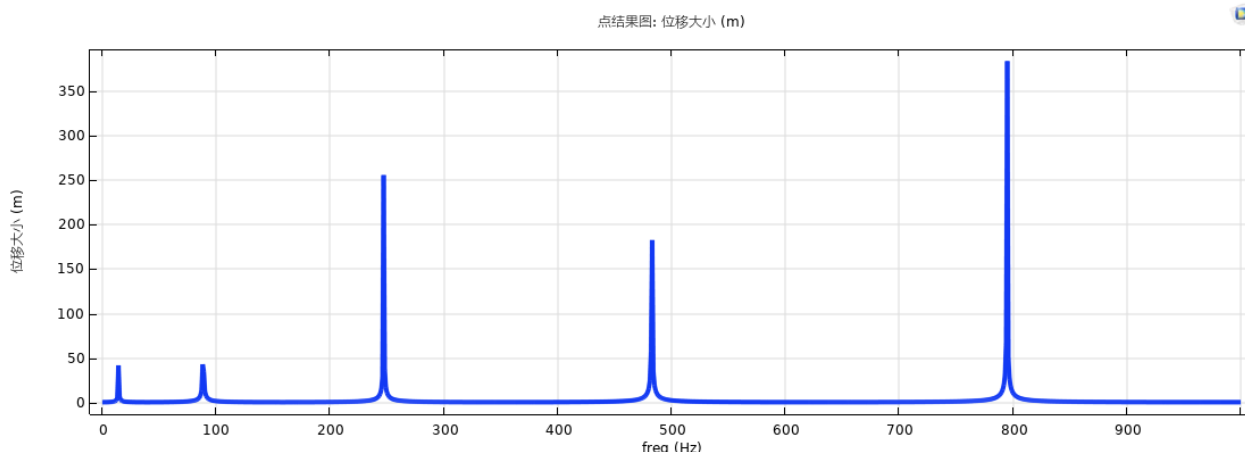


图 3 振幅-频率曲线

Figure 3. Amplitude-Frequency Curve

为了进一步分析激励频率对强迫振动特性的影响, 通过设计了一系列实验, 并记录了在不同激励频率下的振动响应数据.

在低频激励下, 观察到当施加低频激励时, 杆件的振动位移呈现出较为平滑的周期性变化. 初始阶段, 杆件在激励作用下开始振动, 位移逐渐增大; 随着时间的推移, 振动位移达到最大值, 并在每个激励周期内重复这一过程. 这种振动模式相对稳定如图 4 所示.

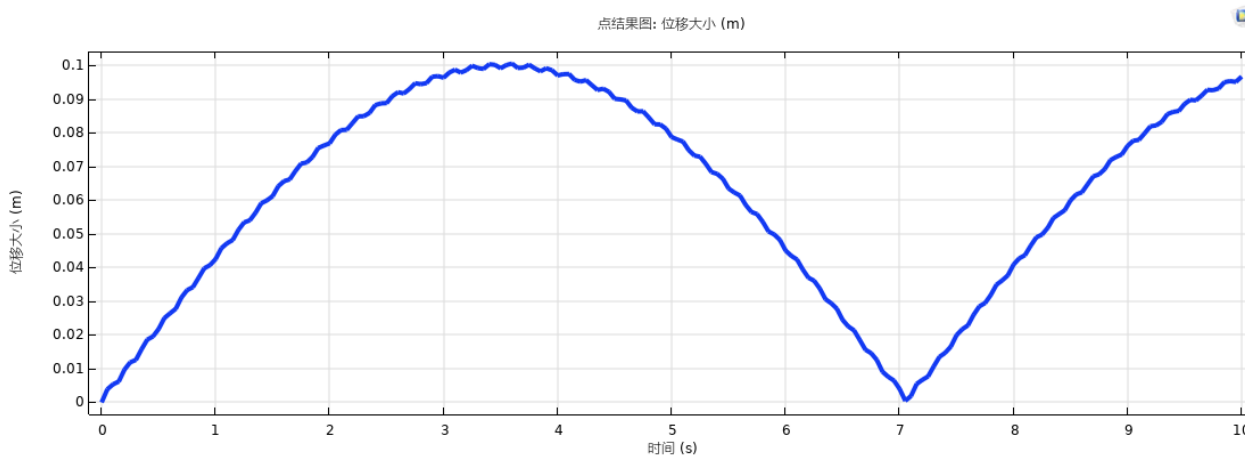


图 4 特征频率为 14.132 下杆件位移随时间变化

Figure 4. Shows the variation of the displacement of the lower member over time at a characteristic frequency of 14.132

激励频率处于中频范围时, 杆件的振动位移呈现出较为显著的波动趋势. 这种波动既非低频时的平稳缓慢, 也非高频时的快速振荡, 而是介于两者之间的一种过渡状态.

随着时间的推移, 振动位移的变化曲线呈现出周期性的起伏. 在每一个周期内, 杆件首先经历一个快速的位移增加阶段, 随后是一个相对缓慢的位移减小阶段. 这种周期性变化反映了杆件在中频激励下的动态响应特性. 如图 5 所示.

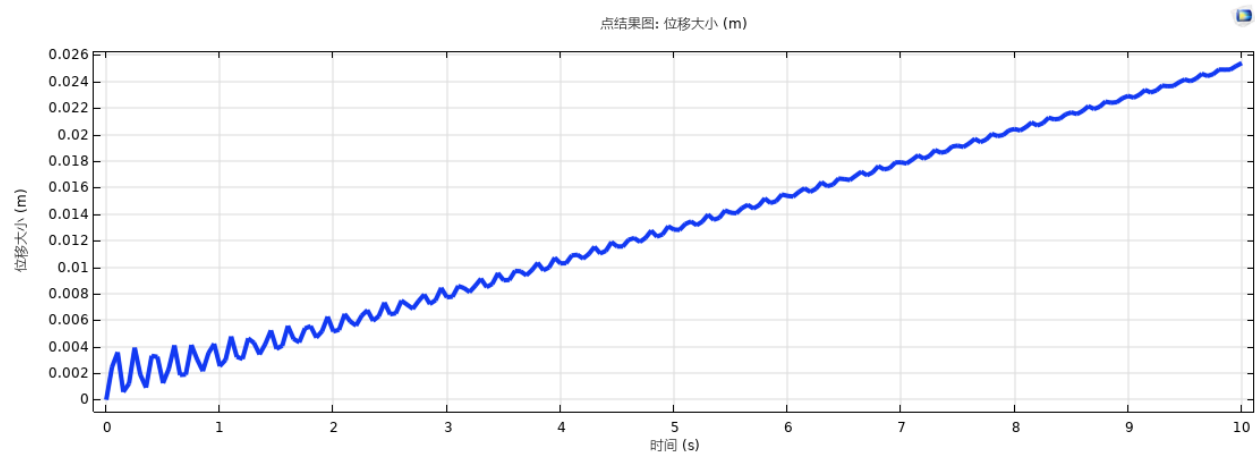


图 5 在特征频率为 247.12 特征频率下杆件位移随时间变化
Figure 5. Shows the variation of member displacement over time at a characteristic frequency of 247.12

在高频激励下, 杆件的振动位移变化曲线呈现出显著的特点. 首先, 随着激励频率的增加, 杆件振动的振幅逐渐减小, 这是由于高频振动中杆件内部的能量耗散加剧, 导致振动能量难以积累. 同时高频激励下杆件的振动周期明显缩短, 如图 6 所示.

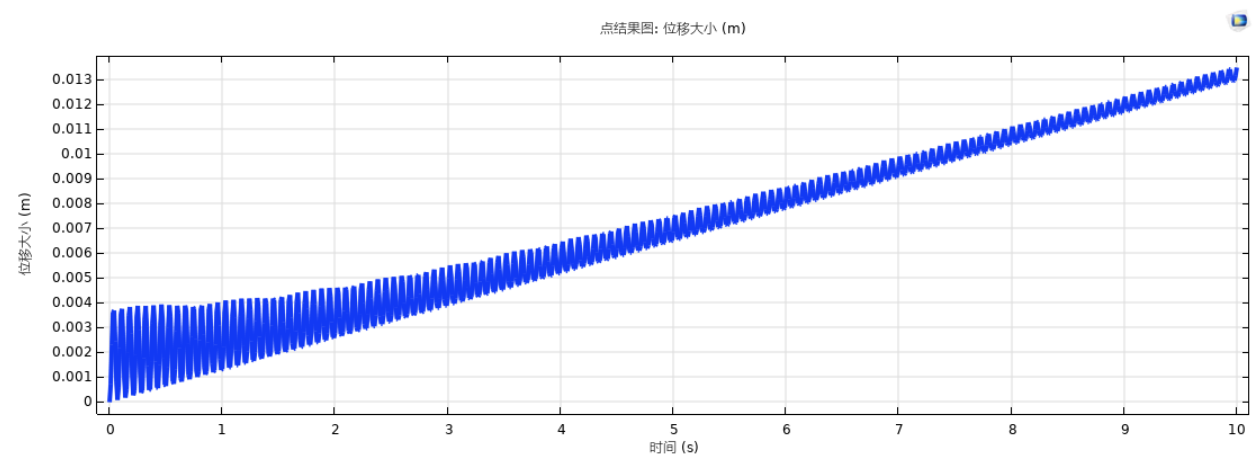


图 6 在特征频率为 482.76 下杆件位移随时间变化
Figure 6. Shows the change of member displacement over time at a characteristic frequency of 482.76

通过对支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性进行数值仿真参数影响分析, 本文得出以下关键发现:

表 2 激励参数对细长杆件的强迫振动特性的影响
Table 2. The Effect of Excitation Parameters on the Forced Vibration Characteristics of Slender Rods

参数	影响结果	详细描述
激励频率	强迫振动特性显著改变	当激励频率接近细长杆件的自然频率时, 系统的响应最为敏感。
激励幅值	影响振幅和能量传递	增加激励幅值会导致振幅增大, 同时能量传递效率也随之提高。

在激励频率方面, 实验数据表明, 当激励频率接近或等于细长杆件的自然频率时, 细长杆件的响应达到最大. 这是因为此时系统的振动模式与外部激励频率

相匹配, 导致能量在系统中高效传递. 随着激励频率偏离自然频率, 响应幅度逐渐减小, 这一现象说明了细长杆件的振动特性受激励频率的显著影响.

在激励幅值方面, 仿真结果显示, 随着激励幅值的增加, 细长杆件的振幅和能量传递效率均呈上升趋势. 这表明激励幅值的增加能够有效地提高系统的响应水平, 从而使得振动特性更加明显.

支座类型的不同也对细长杆件的振动特性产生重要影响. 固定支座由于其约束条件较为严格, 能够有效地限制细长杆件的振动模式, 使得系统在某些频率下的响应更加稳定. 相比之下, 滑动支座允许一定程度的位移, 从而为细长杆件提供了更多的振动可能性.

4 结束语

支座周期性激励下细长杆件的强迫振动特性受到激励频率, 激励幅值以及支座类型等因素的显著影响. 通过调整这些参数, 可以有效地控制细长杆件的振动行为, 满足不同工程应用的需求. 本文所展示的幅频特性仿真都是在阻尼比为零的情况下, 未来可以研究在不同阻尼情况下的振动分析, 或者在不同的在考虑多种激励作用, 不同材料, 不同几何形状对细长杆件振动特性的影响, 例如通过隔振器则可以通过改变系统的固有频率, 使激励频率远离系统的共振区域, 从而降低振动响应. 以及如何通过优化设计来提高系统的抗振性能, 避免因为共振而产生危害.

参考文献

- [1] 冯加伟, 梁思颖, 李天斌. 大型结构物细长杆件涡激振动的抑制 [J]. 中国海洋平台, 2021, 36 (06): 41-44.
- [2] 杨阳, 袁媛辉, 李国伟. 基于周期性激励的采煤机电液截割传动系统特性分析 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (03): 217-222. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.03.034.
- [3] 谢苗, 石俊杰, 张鸿宇, 等. 多激励下新型纵轴式掘进机的纵向振动特性预测 [J]. 工程设计学报, 2023, 30(06):728-737.
- [4] 赵翔, 李思谊, 李映辉. 含阻尼多裂纹 Euler-Bernoulli 曲梁强迫振动的 Green 函数解 [J]. 力学与实践, 2021, 43 (06): 896-904.
- [5] 孙志礼, 于瀛, 赵千里, 等. 两端支承式输流管路的强迫振动分析 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2018, 39 (02): 221-225.
- [6] 张红巧, 田瑞兰, 陈恩利, 等. 参数激励下均质杆状双摆的周期稳定振动 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (16): 231-235. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.16.031.
- [7] 侯佳佳, 张雷, 赵洋, 等. 基于共振与非共振双线的自吸收免疫 LIBS 技术研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (01): 261-265.

References

- [1] Feng Jiawei, Liang Siying, Li Tianbin. Suppression of Vortex-Induced Vibration of Slender Members in Large Structures [J]. China Offshore Platform, 2021, 36(06): 41-44.
- [2] Yang Yang, Yuan Aihui, Li Guowei. Analysis of the Electromechanical-Hydraulic Cutting Transmission System Characteristics of a Coal Harvester Based on Periodic Excitation [J]. Vibrations and Shock, 2018, 37(03): 217-222. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.03.034.
- [3] Xie Miao, Shi Junjie, Zhang Hongyu, et al. Prediction of longitudinal vibration characteristics of a new type of vertical-axis tunneling machine under multiple excitations [J]. Journal of Engineering Design, 2023, 30(06):728-737.

- [4] Zhao Xiang, Li Siyu, Li Yinghui. Green's Function Solution for Forced Vibration of Damped Multi-Cracked Euler–Bernoulli Curved Beams [J]. Mechanics and Practice, 2021, 43(06): 896-904.
- [5] Sun Zhili, Yu Ying, Zhao Qianli, et al. Forced vibration analysis of two-end supported flow pipelines [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2018, 39(02): 221-225.
- [6] Zhang Hongqiao, Tian Ruilan, Chen Enli, et al. Periodic Stable Vibration of Homogeneous Rod Double Pendulum under Parametric Excitation [J]. Vibration and Impact, 2020, 39(16): 231-235. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.16.031.
- [7] Hou Jiajia, Zhang Lei, Zhao Yang, et al. Study on self-absorption-free immuno-LIBS technology based on resonant and non-resonant dual lines [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(01): 261-265.