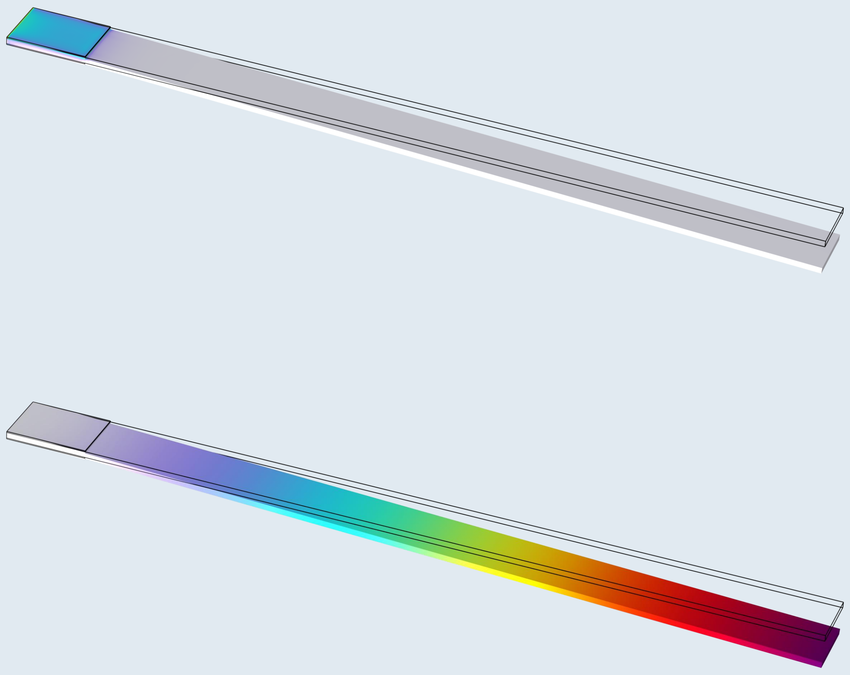


基于 COMSOL 建模的压电悬臂梁多模态振动抑制

李文[1]，黄钰康[1]

1. 天琴中心, 物理与天文学院, 中山大学, 珠海, 中国.

研究目的

压电智能结构可利用压电材料的正、逆压电效应实现结构振动的感知与主动控制。对于压电悬臂梁，基体结构与压电元件之间存在复杂的三维机电耦合，采用简化解析模型难以完整描述其多模态动力学特性。主动振动控制器的设计需要同时获得外部扰动、压电作动、结构响应和压电传感之间准确的动力学关系。本文利用 COMSOL Multiphysics® 建立压电悬臂梁三维机电耦合有限元模型，构建包含尖端扰动力、作动压电片电压、尖端位移及传感电荷的两输入两输出模型，并通过模态降阶获得适用于控制器设计的低阶动力学模型，为后续积分力反馈(Integral Force Feedback, IFF)和位置正反馈(Positive Position Feedback, PPF)主动振动控制提供高保真的控制对象。

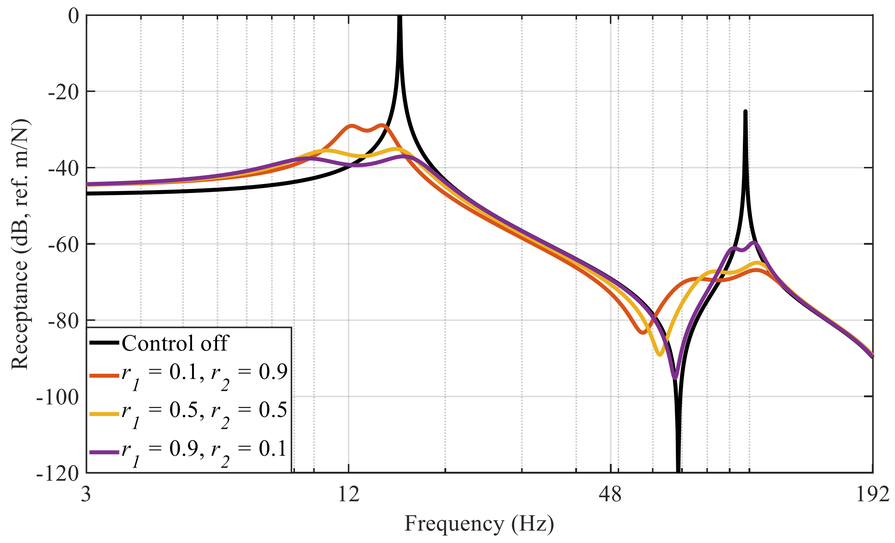


图1. 多模态积分力反馈控制效果

方法

采用 COMSOL Multiphysics® 建立三维压电悬臂梁模型。模型采用三维线性弹性—压电耦合方程，一端完全固定，在自由端截面施加横向扰动力并提取其平均横向位移；作动片施加驱动电压，通过压电耦合获得结构作动与传感响应。分别定义尖端扰动力和作动电压为两个输入，尖端位移和传感电荷为两个输出。完成网格划分后进行特征频率和静力分析，提取模态频率、模态质量、机电耦合系数及静态增益，进一步保留前八阶模态建立降阶状态空间模型，并导入 MATLAB 用于后续主动振动控制器设计。

结果

通过 COMSOL 仿真得到的降阶状态空间方程，对系统进行参数辨识，并根据辨识结果完成对应的多模态积分力反馈和位置正反馈控制器设计，并将控制器连接到压电作动-传感回路进行闭环。

图一和图二中，从悬臂梁尖端力到位移的响应被确定为目标函数，通过调整控制器对不同模态的权重系数，能够实现对不同模态的振动抑制效果的调整。

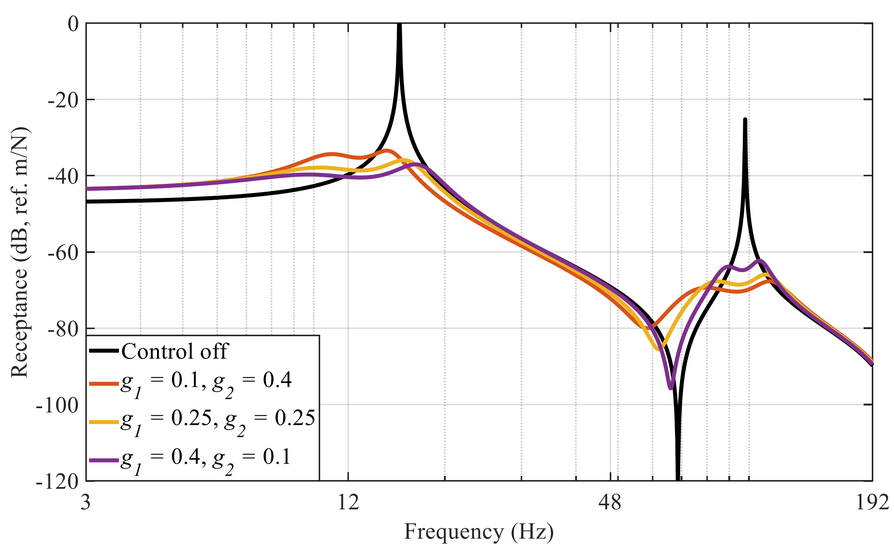


图2. 多模态位置正反馈控制效果

参考文献

1. Li W, Lin X, Lian J, et al. Fixed-Point Optimization of a Network of Active Tuned Inerter Dampers for Multimodal Vibration Suppression[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2026, 31(4): 4377-4387.
2. Li W, Lin X, Lian J, et al. Multi-modal vibration suppression using enhanced positive position feedback control[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2026, 326.
3. Zhao G, Raze G, Paknejad A, et al. Active tuned inerter-damper for smart structures and its $\mathcal{H}\infty$ optimisation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 129: 470-478.
4. Zhao G, Paknejad A, Raze G, et al. Nonlinear positive position feedback control for mitigation of nonlinear vibrations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132: 457-470.

中山大學 天琴中心
TIANQIN CENTER FOR GRAVITATIONAL PHYSICS, SYSU