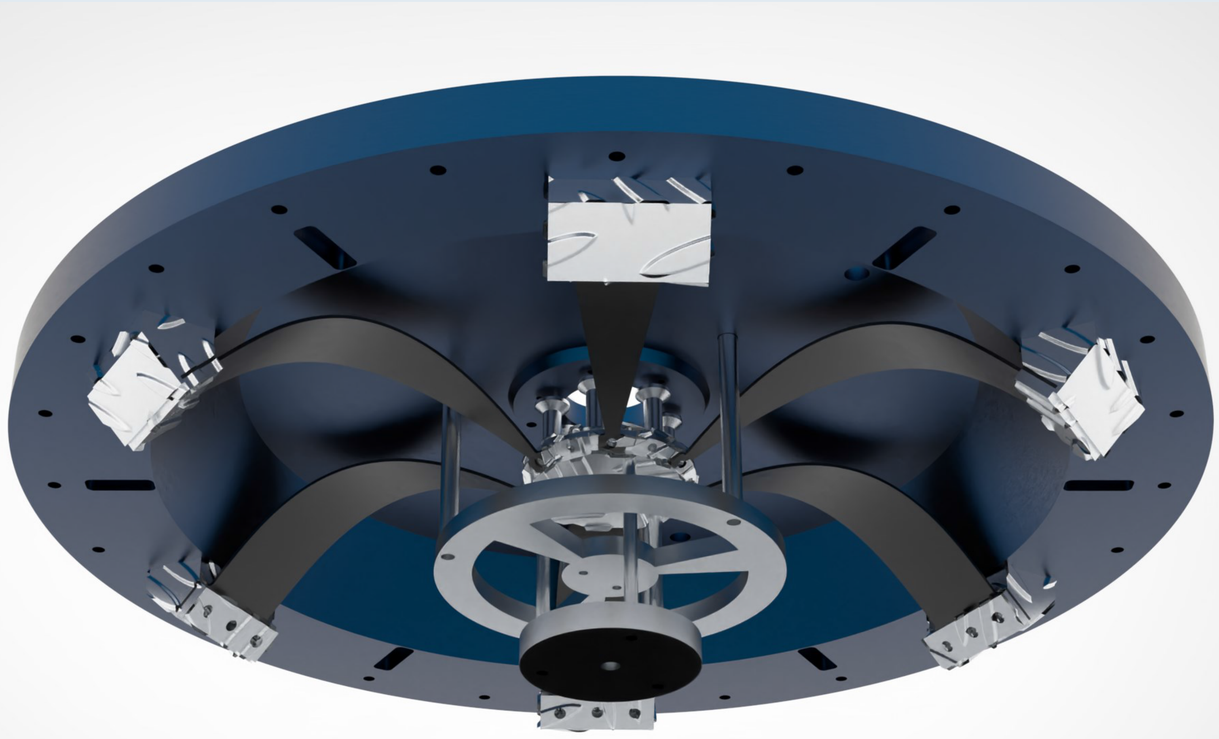


基于 COMSOL 的几何反弹簧悬臂梁叶片大变形静力响应与负刚度特性分析

林馨[1], 鲍敬焜[1], 李明明[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

精密测量设备更高精度和灵敏度的需求，使地面振动抑制性能的提升成为亟待解决的问题之一。目前，常用被动隔振、主动隔振、半主动隔振和主被动隔振相结合四种方式[1]。几何反弹簧悬臂梁叶片通过大变形产生负刚度，是几何反弹簧竖直低频隔振系统的核心弹性元件。实际设计中，叶片预成形幅度较大，直接加载容易造成非线性求解不收敛；同时，安装预变形与工作行程相互耦合，难以获得完整、连续的力—位移关系。

本工作建立考虑几何非线性的三维实体模型，连续追踪叶片由安装预成形状态至双向工作行程的静态平衡路径，识别负刚度区间并同步评估等效应力，为叶片结构设计、强度校核及隔振系统刚度匹配提供依据。

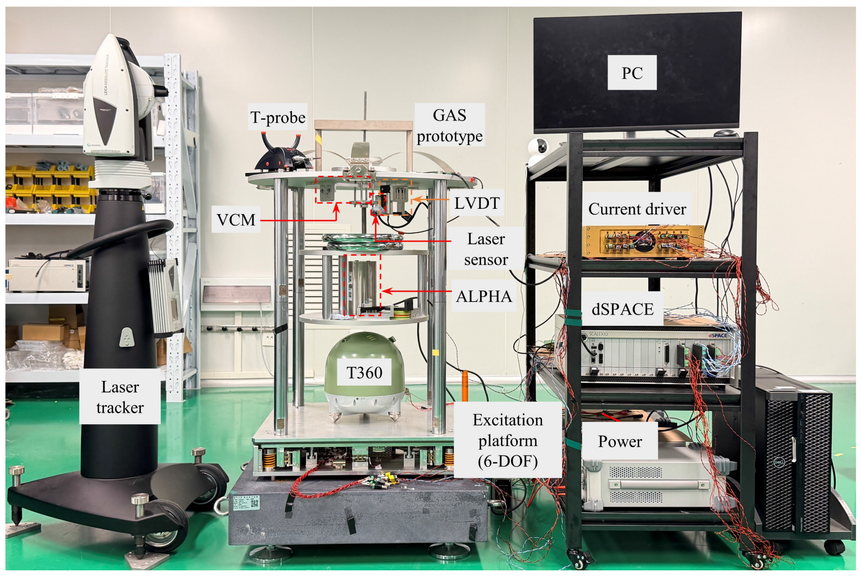


图1. 几何反弹簧平台实物图与实验环境

方法

叶片三维结构在 SolidWorks 中建立后导入 COMSOL Multiphysics，采用固体力学接口和线弹性材料。叶片一端固定，另一端通过刚性连接件施加竖直位移，并启用几何非线性。采用两阶段位移延续法：首先逐步施加预成形位移，使叶片达到安装构型并获得预应力；随后以该状态为初始解，沿竖直方向加载 ±40 mm，追踪静态平衡路径。提取刚性连接件的Z向反力 R_z，定义等效支承力$F_{eq} = -R_z$，并通过切线刚度$k_t = \mathrm{d}F_{eq}\mathrm{T}\mathrm{d}z$及von Mises应力评估叶片性能。

结果

两阶段位移延续方法可连续衔接安装预成形与工作行程分析，获得−40 ~ 40 mm范围内的双向力—位移曲线，并避免直接加载未变形状态带来的求解困难。在目标工作区间内，叶片等效支承力随竖直坐标增大而减小，表现出负切线刚度特性。泊松比取0和0.3时，整体力—位移曲线差异较小，表明其对整体静力响应影响有限。该模型还可获得全行程内的等效应力分布，为危险位置识别、强度校核及正负刚度匹配提供依据。

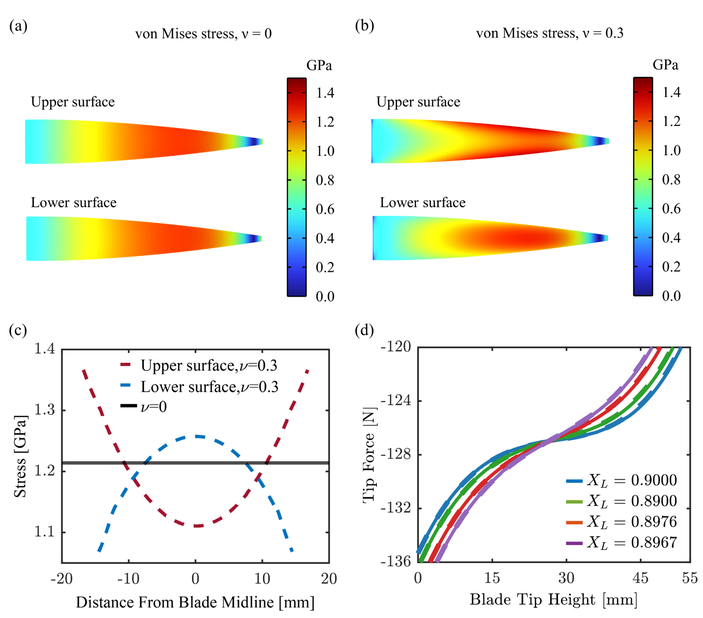


图2. 系统模型分析结果

参考文献

1. Bertolini A, Cella G, DeSalvo R, Sannibale V. Seismic noise filters, vertical resonance frequency reduction with geometric anti-springs: A feasibility study. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 1999, 435(3): 475–483. DOI: 10.1016/S0168-9002(99)00554-9.
2. Cella G, Sannibale V, DeSalvo R, Márka S, Takamori A. Monolithic geometric anti-spring blades. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2005, 540(2–3): 502–519. DOI: 10.1016/j.nima.2004.10.042.
3. Xin Lin, Wen Li, Junxiang Lian, Guoying Zhao, High-load vertical isolation system using geometric anti-spring and hybrid feedback, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 327, 2026, 111967, ISSN 0020-7403.

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