

亚 μg 微光机械加速度计的自由几何理性设计

卢乾波¹, 王小旭²

(1. 西北工业大学柔性电子研究院 西安 710129;

2. 西北工业大学自动化学院 西安 710129)

Email: iamqlu@nwpu.edu.cn

摘要: 微光机械加速度计融合了精密光学测量和微机电系统的优势, 是有望实现亚 μg 片上加速度测量的新形态加速度计, 也是高精度惯性导航、相对重力测量等国防应用必不可少的核心惯性器件。针对微光机械加速度计敏感-测量单元多物理场耦合机制复杂、设计工具普遍低效且未能很好协同的难题, 本团队建立了计算智能驱动的自由几何理性设计方法: 通过局部可修自由曲线统一建模, 解决了模型复杂度和自由度的矛盾; 通过跨体系融合算法驱动的多级优化, 平衡了多物理场昂贵问题优化效率和精度; 通过不确定性分析和局部修调, 实现了设计性能与可靠性的灵巧兼顾。团队通过该理性设计方法设计并制作了基于局部可修自由几何反弹簧柔顺结构和光栅光腔的 ng 级加速度计/地震仪, 实现了现有报道片上敏感结构中最低的固有频率 ($\sim 1\text{ Hz}$) 和最高加速度-位移灵敏度 ($>80\text{ mm/g}$); 设计并制作了具有大自由度光强位移响应的多种光腔式位移测量单元, 位移测量精度达飞米量级; 合作研制了惯性导航用光电加速度计, 实现了半年稳定性优于 $2\ \mu\text{g}/5\text{ppm}$, 量程 60 g , 尺寸小于 25 mm^3 等各项指标, 八小时稳定性、半年重复性、环境适应性等指标亦国内领先。自由几何理性设计方法为微纳光机电传感器件和片上系统的设计提供基础理论支撑和设计工具革新, 也助力了微小型亚 μg 加速度计的实现, 为国防现代化提供了新动能。

关键词: 微加速度计; 高精度加速度计; 光机械结构; 自由几何; 理性设计; 片上系统

1、研究背景

微光机械加速度计融合了精密光学测量和微机电系统的优势, 是有望实现亚 μg 片上加速度测量的新形态加速度计, 也是高精度惯性导航、相对重力测量等国防应用必不可少的核心惯性器件。加速度计的性能由加速度敏感单元、位移测量单元和反馈控制单元共同决定, 其中敏感-测量单元(感测单元)尤其是其核心单元。当前亚 μg 微光机械加速度计的感测单元设计面临如下重大挑战: (1) 应用场景需求多样, 现有模型自由度不足。微小型高性能加速度计应用场景多样, 目标性能差异巨大, 这要求感测单元拥有足够的模型自由度, 但过多的模型参数又会导致优化和设计效率低下, 因此如何实现低模型复杂度下的大设计自由度存在挑战。(2) 感测单元深度耦合, 多物理场协同优化困难。机械加速度敏感单元和光学位移测量单元深度耦合, 两个单元既有独立的变量和性能参数, 又共同决定加速度计的输出, 其总体变量输出关系复杂且无法简单解耦, 是

一个需要协同的多物理场昂贵优化问题。(3) 单元设计裕度小，性能与可靠性难兼顾。感测单元尺寸空间有限，设计裕度小，如何在保证单元设计效率和性能的前提下兼顾设计可靠性也是亟需应对的挑战。

现有感测单元建模通常采用简单几何形状，且针对单一光学、机械对象，未能很好平衡全局可调性和局部可修性；基于代理模型和深度学习的设计方法存在代理精度和数据集构建成本问题，难以解决深度耦合下感测单元设计性能和设计效率矛盾；常见的不确定性分析方法或缺乏分析精度，或需要全局调整设计，难以兼顾小设计裕度下的加速度计设计效率和可靠性。因此迫切需要解决：面向光机械结构多对象建模的复杂度与自由度平衡，以及多物理场昂贵问题的优化效率与性能、可靠性协同的关键科学问题。

2、研究内容

本团队建立了计算智能驱动的微光机械加速度计感测单元自由几何理性设计方法：通过局部可修自由曲线统一建模，解决了模型复杂度和自由度的矛盾；通过跨体系融合算法驱动的多级优化，平衡了多物理场昂贵问题优化效率和精度；通过不确定性分析和局部修调，兼顾了设计性能与可靠性。

在加速度敏感单元方面，团队通过该理性设计方法设计并制作了基于局部可修自由几何反弹簧柔顺结构，实现了现有报道片上敏感结构中最低的固有频率 (~ 1 Hz) 和最高加速度-位移灵敏度 (>80 mm/g)，并结合光栅光腔式位移测量单元完成了 ng 级加速度计 / 地震仪的制作与原理验证 [1]-[3]；在位移测量单元方面，团队设计并制作了具有大自由度光强位移响应的多种光腔式位移测量单元，位移测量精度达飞米量级 [4][5]；同时，团队与工业部门合作研制了惯性导航光电加速度计，实现了半年稳定性优于 $2 \mu\text{g}/5\text{ppm}$ ，量程 60 g，尺寸小于 25 mm³ 等各项指标，八小时稳定性、半年重复性、环境适应性等指标亦国内领先，且已在重大型号任务上得到应用。

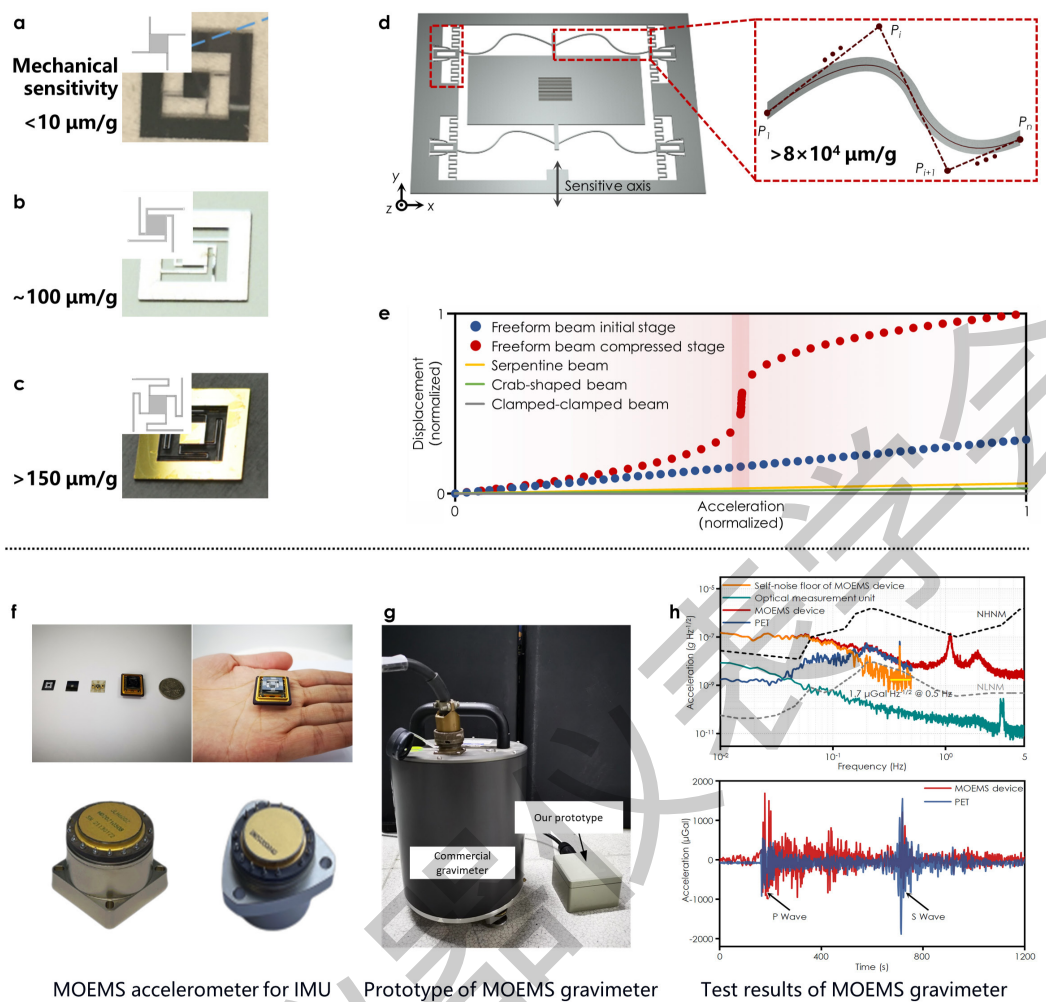


Fig. 1 Achievements of the rational design of micro-optomechanical accelerometers. (a)-(e) demonstrations of different acceleration-sensing structures, (f)-(h) prototypes of different models of MOEMS accelerometers.

3、结论

本团队针对微光机械加速度计敏感-测量单元多物理场耦合机制复杂、设计工具普遍低效且未能很好协同的难题，建立了自由几何理性设计方法的新范式，成功消解了模型复杂度与设计自由度、多物理场优化效率与性能、设计性能与可靠性的基本矛盾。自由几何理性设计方法为微纳光机电传感器件和片上系统的设计提供基础理论支撑和设计工具革新，也助力了微小型亚 μg 光电加速度计的最终实现，为国防现代化和新型工业化提供了新动能。

参考文献

- [1] Nature Communications, 2024, in revision.
- [2] Lu Q, Bai J, Wang K, et al. Design, optimization, and realization of a high-performance MOEMS accelerometer from a double-device-layer SOI wafer[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(4): 859-869.
- [3] Lu Q, Wang C, Bai J, et al. Minimizing cross-axis sensitivity in grating-based optomechanical accelerometers[J]. Optics express, 2016, 24(8): 9094-9111.
- [4] Lu Q, Xiao Q, Liu C, et al. Inverse design and realization of an optical cavity-based displacement transducer with arbitrary responses[J]. Opto-Electron Adv, 2023, 6: 220018.
- [5] Xiao Q, Wu S, Wang Y, et al. Error analysis and realization of a phase-modulated diffraction grating used as a displacement sensor[J]. Optics Express, 2023, 31(5): 7907-7921.