

微纳尺度结构动力学专刊序^{*}

胡开明^{1†} 李成² 刘汝盟³

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

(2. 常州工学院 汽车工程学院, 常州 213032)

(3. 南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

摘要 围绕微纳尺度结构跨尺度动力学建模、动力学分析、动力学控制、动力学设计与测量方法等研究主题, 本专刊介绍了微纳尺度结构动力学与控制领域的一些最新研究成果。

关键词 微纳尺度结构, 跨尺度动力学, 器件动力学设计, 动力学测试

中图分类号: TB383; TB34

文献标志码: A

Preface of Special Issue on Micro/Nano-scale Structural Dynamics^{*}

Hu Kaiming^{1†} Li Cheng² Liu Rumeng³

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. School of Automotive Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

(3. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract This special issue introduces some of the latest research achievements in the field of micro/nanoscale structure dynamics and control, focusing on research topics such as cross-scale dynamic modeling, dynamic analysis, dynamic control, dynamic design and measurement methods.

Key words micro/nanoscale structures, cross-scale dynamics, device dynamics design, dynamics measurement

序言

微/纳机电系统 (MEMS/NEMS) 是微纳机械结构和微电路在三维芯片上的集成技术, 具有体积小、质量轻、功能强、功耗低、性能优越等特点, 在机械电子、信息通信、航空航天、生物医学、环境能源、

军事国防等领域有着广阔的应用前景, 为面向国家重大战略需求的变革性前沿研究方向^[1]。

随着微纳加工技术的飞速发展, MEMS/NEMS 器件得以更加智能化、小型化、多功能化、集成化, 器件结构特征尺寸从百微米级减小到纳米级甚至亚纳米级, 微纳尺度器件工作时会

2024-10-10 收到第 1 稿, 2024-10-15 收到修改稿。

^{*} 国家自然科学基金项目(12032015, 12121002, 12172216), 上海市学术/技术研究带头人计划(19XD1421600), 上海交通大学双一流建设项目(WH220402002), 国家重点研发计划重点专项(2021YFB3202200), 上海交通大学“深蓝计划”基金项目(SL2023MS005), Natural Science Foundation of China(12032015, 12121002, 12172216), Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader (19XD1421600), Double First-Class Construction Project of Shanghai Jiao Tong University (WH220402002), National Key R&D Program of China (2021YFB3202200), Oceanic Interdisciplinary Program of Shanghai Jiao Tong University (SL2023MS005)。

[†] 通信作者 E-mail: hukaiming@sjtu.edu.cn

的非线性现象及复杂的非线性动力学行为,这为利用新效应、新原理、新材料、新工艺与新技术对 MEMS/NEMS 器件动力学设计、制备及应用提出了严峻的挑战。然而,宏观尺度结构动力学理论建模理论、分析方法、调控技术通常不适用于研究微纳尺度动力学行为。

为此,学术界和工程界迫切需要进一步开展持续深入的研究,推动动力学与控制学科向微纳极端尺度系统发展。为了及时总结微纳尺度结构动力学的最新成果,《动力学与控制学报》特组织“微纳尺度结构动力学”专刊,共包括 9 篇论文(含 2 篇综述论文),涉及微纳尺度结构跨尺度动力学建模、动力学分析、动力学控制、动力学设计与测量技术等研究,旨在征集和报道微纳尺度结构动力学研究中的创新性研究成果和工程应用。

南京航空航天大学王立峰等^[2]的《纳尺度超材料研究进展》介绍了纳尺度超材料在带隙特性、热管理、多场耦合、振动抑制等方面的实验和理论方面取得的进展,重点关注纳尺度超材料的声子带隙和传输特性,介绍了其在减振降噪和弹性波调控方面的进展,同时简要阐述了纳尺度超材料在热管理和多场耦合方面的研究成果,还进一步展望了纳尺度超材料未来的发展方向。

上海交通大学张文明等^[3]的《微机械频率梳动力学行为及应用研究综述》整理了近十年来微机械频率梳领域的一些热点问题。首先介绍了微机械频率梳的形成机理和数值仿真模型。在此基础上,还主要阐述了微机械频率梳基于参数激励、内共振、碰撞效应、负耗散、负非线性摩擦等多种激发原理,总结了国内外现有的研究现状。此外,还从实际应用的角度让读者进一步了解微机械频率梳在相关领域的广泛应用,有助于了解微机械频率梳的自身特点和优势。最后,对微机械频率梳动力学与控制研究的未来发展方向进行了总结和展望。

西南交通大学刘娟等^[4]的《粘弹性基底上功能梯度压电纳米梁波传播特性》利用非局部应变梯度理论(NSGT)探究了含粘弹性基底的功能梯度压电(FGP)纳米梁的波传播特性。基于 NSGT,建立含粘弹性基底的 Euler 梁波传播模型及考虑剪切效应的 Timoshenko 梁模型,利用哈密顿原理推导出波传播控制方程;通过引入两种梁变形理论对应的波传播通解方程,对运动方程组进行求解,探讨

了剪切效应、尺度参数、粘弹性参数、FG 指数等对波传播频率及相速度的影响。

南京航空航天大学王立峰等^[5]的《面向质量探测的单层金刚石片振动的分子动力学研究》采用分子动力学模拟和连续介质理论方法系统研究了带附着质量的单层金刚石片的振动特性,并与单层石墨烯板的结果进行对比。结果表明,单层金刚石和单层石墨烯的固有频率随附着质量的增大而减小。相同尺寸下,单层金刚石比单层石墨烯具有更高的质量灵敏度。预应变会对材料的固有频率产生较大的影响,增加预应变可以显著提高单层金刚石的固有频率,并提升单层金刚石的灵敏度。附着质量的位置也会对固有频率产生影响,当靠近中间时,频移将达到最大值,而附着质量靠近固支边缘时,几乎不会对固有频率产生影响。

浙江大学宦荣华等^[6]的《参激微机械谐振器幅频响应的翘尾效应及其电热调控》研究了微机械梁谐振器在强静电参激下的高阶非线性响应及基于电热电流的响应调控方法。首先,实验发现强静电电力参数激励下微机械梁谐振器的幅频响应不再是 Duffing 硬化曲线,而在响应后半段出现“翘尾”现象。接着,建立了非线性谐振器的参激动力学模型,理论分析表明“翘尾”现象是由非线性阻尼和高阶非线性刚度共同作用引起。然后,研究了梁本体的电热电流对参激响应的影响规律,电热电流的引入会增加微谐振器的热弹性阻尼和轴向应力,从而实现响应幅值和共振区间的大幅调控。上述研究成果一方面丰富了微系统非线性动力学,另一方面也可以为基于高阶非线性的高性能 MEMS 谐振式传感器设计提供新思路。

复旦大学杨晓峰等^[7]的《压电爬行平台高精度步长控制调速方法》提出高精度步长控制调速方法。该方法能够结合速度公式,在定频率下使用电压—单步位移特性对步长精准建模,通过调节切向压电叠堆的电压信号峰峰值控制步长大小,从而忽略率相关特征的影响,满足压电爬行平台调速精度需求。实验证明,在压电爬行平台的倍速控制对比中,高精度步长控制调速方法的控制效果显著优于传统频率控制调速方法。在 2.0 秒定时长的终点位置处,两组对照实验的开环定位误差率分别从 9.642% 和 17.01% 减小至 0.282% 与 0.729%。

上海交通大学胡开明等^[8]的《尺度效应下太赫兹非局部二维纳米薄膜结构涟漪动力学建模方法》通过非局部理论和分子动力学模拟,深入探讨了尺度效应下二维纳米薄膜涟漪动力学特性. 首先,基于非局部 Kirchhoff 板理论,构建了太赫兹激励下二维纳米薄膜涟漪动力学模型,揭示了涟漪波数与太赫兹激励频率的关系. 其次,通过与分子动力学模拟对比,验证了非局部涟漪动力学模型的准确性,并对非局部参数进行了辨识. 进一步,分析了小尺度范围下二维薄膜结构离散分子动力学模型和连续介质理论模型的差异性,讨论了等效厚度,手性和非局部参数等重要参数对涟漪波数和相速度的影响. 上述研究为二维纳米薄膜的力学建模提供了新视角,对基于二维纳米薄膜的纳米器件设计具有重要的理论意义和应用价值.

青岛理工大学毕皓皓等^[9]的《温度场下波纹型薄膜基底结构的动态屈曲分析》研究了温度场作用下薄膜/基底结构的动态屈曲问题. 首先,基于 Euler-Bernoulli 梁理论,建立温度场作用下,薄膜/基底结构非线性振动的控制方程;其次,利用 Galerkin 截断方法和两类变量,将薄膜/基底结构非线性振动的控制方程导入 Hamilton 体系;通过高精度、高数值稳定性的辛 Runge-Kutta 方法求解薄膜/基底结构的 Hamilton 方程,进而讨论温度变化量、阻尼系数等对薄膜/基底结构非线性动力学响应的影响. 研究发现薄膜的温度变化量和预应变会影响薄膜的动力学行为. 随着温度变化量的增加,薄膜/基底结构的振动频率增加,振幅减小. 随着预应变的增加,结构的频率减小,振幅增加. 上述研究结果为基于薄膜/基底结构的柔性电子微纳器件设计提供理论参考.

西南交通大学张波等^[10]的《三层应变梯度微板系统的耦合振动特性》基于修正的应变梯度理论和 Kirchhoff-Love 假设,建立了由 Winkler-Pasternak 弹性夹层连接的三层微板系统的耦合振动模型. 结合 Gauss-Lobatto 求积准则和微分求积准则,构造了具有 4 节点 108 个自由度的 C^2 连续性微分求积有限元,以求解微板系统的耦合振动边值问题. 通过数值算例,验证了上述微分求积有限元法的有效性,讨论了各因素对微板系统振动频率及模态的影响. 结果表明:微板系统发生完全同步振动时,弹性夹层不起作用;应变梯度效应或

弹性夹层刚度不仅影响微板系统的各阶振动频率,而且会使系统产生模态跃迁现象;边界条件对微板系统振动频率计模态的影响显著.

本期专刊为微纳尺度结构动力学领域的研究者提供了宝贵的研究成果和理论参考,但该领域研究内涵和应用领域非常丰富和广泛. 受篇幅所限,本专刊所收录的论文只是微纳尺度结构跨尺度动力学建模、动力学分析、动力学控制、动力学设计与测量方法等特定研究方向上的代表性工作进行展示,还远不够全面. 但我们仍需不断努力,进一步完善该领域研究内容和方法,推动动力学与控制学科向极小尺度机械系统的持续发展和进步.

参考文献

[1] 张文明, 胡开明[M]. MEMS/NEMS 谐振器技术. 北京: 科学出版社, 2023: 475.

[2] 井亚彬, 刘汝盟, 王立峰. 纳尺度超材料研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10): 5-17.

JING Y B, LIU R M, WANG L F. Research progress on nanoscale metamaterials [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10): 5-17.

[3] 吴佳豪, 邵磊, 张文明. 微机械频率梳动力学行为及应用研究综述[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10): 18-31.

WU J H, SHAO L, ZHANG W M. Review on the dynamic behaviors of micromechanical frequency combs and their applications [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10): 18-31.

[4] 刘娟, 王鑫特, 胡彪, 等. 参激微机械谐振器幅频响应的翘尾效应及其电热调控[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10): 32-41.

LIU J, WANG X T, HU B, et al. Wave propagation characteristics of functionally graded piezoelectric nanobeams on viscoelastic substrates [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10): 32-41.

[5] 邓枫昱, 郑卓群, 王立峰. 面向质量探测的单层金刚片振动的分子动力学研究[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10): 42-50.

DENG F Y, ZHENG Z Q, WANG L F. Molecular dynamics study on the vibrations of diamane nanosheet for mass detection [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10): 42-50.

[6] 刘中华, 徐友良, 宦荣华. 参激微机械谐振器幅频

响应的翘尾效应及其电热调控[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10) : 51–58.

LIU Z H, XU Y L, HUAN R H. The Tail-up effect of amplitude-frequency response and its electrothermal control of parametrically excited micro-electromechanical resonator [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10) : 51–58.

[7] 杨奕潇, 孙煜, 康华洲, 等. 压电爬行平台高精度步长控制调速方法[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10) : 59–66.

YANG Y X, SUN Y, KANG H Z, et al. A high precision step-controlled speed regulation method for the piezoelectric crawling stage [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10) : 59–66.

[8] 邹衡, 胡开明, 邓心陆, 等. 尺度效应下太赫兹非局部二维纳米薄膜结构涟漪动力学建模方法[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10) : 67–76.

ZOU H, HU K M, DENG X L, et al. Modeling method for the dynamics of ripples in terahertz non-local two-dimensional nanofilm structures considering scale effects [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10) : 67–76.

[9] 李文杰, 毕皓皓, 张欣刚, 等. 温度场下波纹型薄膜基底结构的动态屈曲分析[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10) : 77–83.

LI W J, BI H H, ZHANG X G, et al. Dynamic buckling analysis of wrinkled film substrate structure under the thermal effect [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10) : 77–83.

[10] 文鹏军, 张波, 李成, 等. 三层应变梯度微板系统的耦合振动特性[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(10) : 84–93.

WEN P J, ZHANG B, LI C, et al. Coupled vibration characteristics of the triple-layered strain gradient microplate system [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(10) : 84–93.