

## 仿生系统动力学与应用专刊序\*

孙秀婷<sup>1†</sup> 陆泽琦<sup>2,3,4</sup>

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)(2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

(3. 上海大学 上海市能源工程力学重点实验室, 上海 200072)

(4. 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

**摘要** 围绕仿生系统动力学建模、设计理论与方法、非线性振动特征、控制方法等研究主题, 本专刊介绍了仿生系统动力学与控制的一些创新性研究和工程应用成果。

**关键词** 仿生机构, 非线性系统, 非线性振动, 振动控制, 仿生机器人

**中图分类号**: O328

**文献标志码**: A

## Preface to the Special Issue: Bionic System Dynamics and Applications\*

Sun Xiuting<sup>1†</sup> Lu Zeqi<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(3. Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(4. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China)

**Abstract** This special issue intends to present the new research progressed of the field of bionic system dynamics and applications. Special topics include dynamic modeling, design principle and method, nonlinear vibration properties, and control strategy.

**Key words** bionic mechanism, nonlinear systems, nonlinear vibration, vibration control, bionic robot

### 引言

仿生学是一门既古老又年轻的学科。人们研究生物体的结构与功能工作的原理, 并根据这些原理发明出新的设备、工具和科技, 创造出适用于生产、学习和生活的先进技术。近年来, 以力学仿生为基础的动力学与控制研究取得了长足的发展和丰硕的成果, 人们在力学仿生指导下陆续实现了扑翼飞行器<sup>[1]</sup>、仿生机器人<sup>[2]</sup>、仿生抑振系统<sup>[3]</sup>、折纸超材料<sup>[4]</sup>等新结构和新材料。学者还在积极探索力学仿

生的内涵机理和外延应用。然而, 仿生动力学的研究依然面临诸多困难, 例如对不同生物和功能的仿生机理没有可借鉴的方法, 具有生物可解释性的控制方法的确定非常困难, 力学仿生的机构设计没有统一的理论框架, 如何表征仿生机构或结构的性能极限等。为了进一步促进仿生系统动力学与控制的发展, 及时总结相关领域的前沿成果, 特组织“仿生系统动力学与应用”专刊, 共包括 9 篇论文(含 2 篇综述论文), 涉及仿生系统动力学建模、设计理论与方法、非线性振动特征、控制方法等研究, 旨在展示

2024-01-19 收到第 1 稿, 2024-02-05 收到修改稿。

\* 国家自然科学基金资助项目(11872037, 11932015, 12122208, 12272210, 12372022, 12372043)和中央高校基本科研业务费专项资金, National Natural Science Foundation of China (11872037, 11932015, 12122208, 12272210, 12372022, 12372043) and Fundamental Research Funds for Central Universities.

† 通信作者 E-mail: 05mech\_sunxiuting@tongji.edu.cn

仿生系统动力学与控制研究中的创新性研究成果和工程应用。

同济大学孙秀婷等<sup>[5]</sup>的《仿生隔振器设计方法研究进展》考虑隔振领域的前沿研究,对基于仿生学思想的隔振吸振器开展综述调研。综述基于仿生灵感来源的不同,对仿生隔振器进行了系统的分类,对不同设计原理的仿生隔振器恢复力本构与隔振性能做了详细的阐述和对比,旨在通过隔振器隔振频带的横向对比厘清几何构型与可调参数的影响,从而明确隔振器几何设计和隔振性能的关系。

上海交通大学胡开明等<sup>[6]</sup>的《车载环境下 MEMS 微镜长期可靠性及控制方法》对新型微光机电系统开展综述调研。论文综述了 MEMS 微镜的微尺度下光调控功能及其在各领域的应用,特别是医疗成像、雷达探测等领域的应用。近年来,以微镜为核心部件的 MEMS 激光雷达因其体积小和功耗低等优势,有望成为更具竞争力的辅助驾驶传感器之一。论文立足 MEMS 微镜可靠性研究领域,综述了高频振动、温湿循环、电磁耦合等极端环境下的分层翘曲、结构断裂、静电吸合、短路烧毁等复杂失效形式及失效机制,总结了 MEMS 微镜常见动力学建模理论及控制方法,讨论并展望了 MEMS 激光雷达车规化面临的主要挑战和发展趋势。

上海大学陆泽琦等<sup>[7]</sup>的《仿生平面三角形单元积分声场的波函数构造》利用 Helmholtz 方程在球坐标系下的解构造了一种与单元积分等效且无需积分的波函数。受仿生复合材料三角形缝合结构启发,以适用范围最广的平面三角形单元为例,构造了波函数的一般形式和内推形式。通过数值仿真对比了两种波函数与直接积分的计算声场的精度和效率。结果表明,两种波函数与直接积分的计算误差低于 0.5%,且内推波函数的计算效率约为直接积分的 6 倍。

同济大学徐鉴等<sup>[8]</sup>的《低频大幅隔振器设计及实验》旨在突破宽幅隔振设计瓶颈。研究引入仿生折纸单元构成非线性隔振器,通过并联装配的方式实现宽幅零刚度特征。研究建立了宽零刚度隔振器模型,提出宽幅零刚度的设计方法,并通过动力学分析了模型的隔振效果。最后搭建试验样机,验证了理论的正确性。这种设计打破了传统准零刚度隔振器单点准零的设计准则,能够在大幅范围内保证稳定性同时实现零刚度,极大拓宽了隔振器的适用范围。

复旦大学张晓旭等<sup>[9]</sup>的《基于库伦-粘性摩擦模型的大腿假肢动力学参数辨识》针对仿大腿假肢的动力学参数辨识和控制问题,基于拉格朗日方法建立了具有固定传动比动力膝关节和非线性传动比动力踝关节的大腿假肢动力学模型,采用库伦-粘性摩擦模型来描述假肢动力学模型中的关节摩擦行为,通过粒子群优化算法辨识了大腿假肢的动力学参数。相比于基于 3D 建模软件的估计参数,基于辨识参数重构的膝、踝关节电机扭矩与实测扭矩的均方根误差分别降低了 99.07% 和 83.33%,模型精度得到了显著提高,为假肢后续的高精度控制提供了技术支撑。

西南石油大学赵翔等<sup>[10]</sup>的《约束 Green 函数与非线性地基梁模态分析》对作为微型机器人重要构件的梁结构开展动力学建模和模态分析,研究考虑非线性建立梁动力学模型,得到了任意位置弹簧和非线性弹簧基础上的梁模态。通过 Laplace 变换和线性叠加原理,定义了梁受约束的 Green 函数,利用数值计算验证了建模和分析的有效性,最终明确了物理参数对梁模态、挠度和变形的影响。

北京工业大学柳超然等<sup>[11]</sup>的《仿猫类落地姿态的准零刚度隔振器》从仿生学的角度,根据猫科动物落地时优秀的抗冲击能力,模拟其落地动作姿态构造一种非对称刚度的高静低动隔振器。研究建立了动力学模型,利用谐波平衡法对具有非对称刚度的动力学系统进行解析分析。通过仿生设计的隔振结构和单一空气弹簧隔振器开展性能对比,发现仿生隔振器的隔振效果和有效隔振带明显优于空气弹簧,从而凸显了仿生设计应用于隔振理论的有效性和可行性。

同济大学宋自根等<sup>[12]</sup>的《基于 CPG 控制的双髻鲨仿生机器人设计与实验研究》研发了一款基于中央模式发生器(CPG)的双髻鲨仿生机器人并给出了推进驱控策略。研究以鱼类基本形态为基础,将鱼身抽象为关节连杆结构,建立了三关节四连杆的仿生机器鱼模型;针对机器鱼正常游动和拐弯运动,进行了 Adams/Simulink 的联合建模仿真计算;最后,实验验证了 CPG 控制器的可行性和有效性。得益于仿生构型、中央模式发生器、柔性硅胶材料的应用,该仿生机器鱼与传统水下推进器相比噪音更小,环境适应能力更强,在如野外勘测、水下救援、水域巡逻等领域具有应用前景。

同济大学张舒等<sup>[13]</sup>的《机械臂负载移动性能与运动调控研究》对大负载机械臂的精度控制开展研究. 论文以 Franka 七轴串联机械臂为对象, 采用 M-DH 法和雅可比迭代法对其正、逆运动学展开分析; 采用三次函数插值法进行关节空间的轨迹规划, 并利用梯形加减速法和逆运动学分析进行笛卡尔空间的轨迹规划. Admas 和 Simulink 联合动力学仿真验证了本文动力学模型的有效性. 最后, 基于定位控制, 确定末端位置误差收敛速率、负载质量、控制参数之间的关系.

仿生系统动力学的类别、研究内涵和应用领域十分广阔. 受篇幅所限, 本专刊仅收录了某些特定研究方向上的代表性论文, 还远不够全面. 其他重要方向, 如仿生系统反问题、肌骨动力学建模、智能控制及其进一步在航空、航天、船舶、海洋工程、机器人、交通等领域的应用和研究有待重视和深入.

## 参考文献

- [1] HOU K, TAN T, WANG Z, et al. Scarab beetle-inspired embodied-energy membranous-wing robot with flapping-collision piezo-mechanoreception and mobile environmental monitoring [J/OL]. *Advanced Functional Materials*, 2023[2024-01-19]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.202303745>.
- [2] TANG C, DU B Y, JIANG S W, et al. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale [J]. *Science Robotics*, 2022, 7(66): eabm8597.
- [3] SUN X T, WANG F, XU J. A novel dynamic stabilization and vibration isolation structure inspired by the role of avian neck [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 193: 106166.
- [4] ZHU Y, FEI F, FAN S, et al. Reconfigurable origami-inspired metamaterials for controllable sound manipulation [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(3): 034029.
- [5] 肖国栋, 孙秀婷. 仿生隔振器设计方法研究进展 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 4—22.  
Xiao G D, Sun X T. Advances in design methods for bio-inspired isolators [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 4—22. (in Chinese)
- [6] 周泽宇, 胡开明, 屠尔琪, 等. 车载环境下 MEMS 微镜长期可靠性及控制方法 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 23—52.  
Zhou Z Y, Hu K M, Tu E Q, et al. Long-term reliability and control methods of MEMS micromirror in automobile environment [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 23—52. (in Chinese)
- [7] 贺佐潦霜, 陆泽琦, 丁虎, 等. 仿生平面三角形单元积分声场的波函数构造 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 53—58.  
He Z L X, Lu Z Q, Ding H, et al. Construction of wave function for integrating sound field with biomimetic planar triangular elements [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 53—58. (in Chinese)
- [8] 孙秀婷, 孙英超, 钱佳伟, 等. 低频大幅隔振器设计及实验 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 59—67.  
Sun X T, Sun Y C, Qian J W, et al. Design and experiment of a vibration isolator for low frequency and large amplitude excitation [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 59—67. (in Chinese)
- [9] 张稳, 吕阳, 徐鉴, 等. 基于库伦-粘性摩擦模型的大腿假肢动力学参数辨识 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 68—76.  
Zhang W, Lv Y, Xu J, et al. Dynamic parameter identification for an ankle-knee prosthesis with Coulomb-viscous friction [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 68—76. (in Chinese)
- [10] 赵翔, 王琦, 朱伟东, 等. 约束 Green 函数与非线性地基梁模态分析 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 77—84.  
Zhao X, Wang Q, Zhu W, et al. Constrained Green function and nonlinear foundation beam modal analysis [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 77—84. (in Chinese)
- [11] 张伟, 石沐辰, 柳超然. 仿猫类落地姿态的准零刚度隔振器 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 85—93.  
Zhang W, Shi M C, Liu C R. Quasi-zero-stiffness vibration isolator inspired by the cat landing attitude [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 85—93. (in Chinese)
- [12] 周宇斐, 岳新阳, 宋自根. 基于 CPG 控制的双髻鲨仿生机器人设计与实验研究 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 94—99.  
Zhou Y F, Yue X Y, Song Z G. Bionic robot inspired by the hammerhead shark with a CPG-based controller [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 94—99. (in Chinese)
- [13] 陈星宇, 张舒. 机械臂负载移动性能与运动调控研究 [J]. *动力学与控制学报*, 2024, 22(2): 100—110.  
Chen X Y, Zhang S. Research on movement performance and motion control of manipulator with load [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2024, 22(2): 100—110. (in Chinese)