

受蜂鸟鹰蛾启发的仿生全向自适应 压电振动发电机研究

潘兴宇^{1,2}, 王杨洋^{1,2}, 张家豪^{1,2}, 王光庆^{1,2*}

(1. 浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江杭州 310018; 2. 浙江工商大学萨塞克斯人工智能学院, 浙江杭州 310018)

摘 要: 随着物联网技术的快速发展, 海量低功耗微纳器件(如无线传感器节点)的供电问题日益突出。传统电池供电方式面临更换频繁、维护成本高、环境污染严重等挑战, 因此发展自供电技术成为当前研究的热点。压电振动发电机因其能量密度高、结构简单、易于集成等优势, 在解决低功耗器件自供电问题方面展现出巨大潜力。本文受蜂鸟鹰蛾在空中悬停时展现出的强稳定性调控能力启发, 提出了一种仿生蜂鸟鹰蛾的无源全向自适应压电振动发电机。该发电机由深沟球轴承构成的旋转部件与安装在旋转部件中心的压电悬臂梁组成, 其中压电悬臂梁的上下弯曲振动模仿蜂鸟鹰蛾翅膀的上下拍振, 而压电悬臂梁的自适应旋转运动则模仿蜂鸟鹰蛾绕质心的自适应悬停运动, 从而实现全向自适应调节与稳定性调控, 显著提升了发电机对不同方向环境振动的适应能力。基于能量法建立了发电机的分布参数机电耦合非线性动力学模型, 深入揭示了弯曲振动模式与旋转运动之间的耦合行为。通过数值仿真与实验测试相结合的方法, 系统研究了发电机在不同初始旋转角度($0^\circ \sim 360^\circ$)条件下的自适应方向调节特性、稳定性机理及动力学响应。研究表明: 所提出的仿生全向自适应压电振动发电机能够在任意方向的外部激励下, 通过无源自适应旋转调节, 使压电悬臂梁最终稳定在与激励方向一致的位置, 并保持大幅值的弯曲振动输出。与传统固定式或阵列式多方向压电发电机相比, 该发电机无需多悬臂梁组合或复杂异形结构, 仅采用单一压电悬臂梁即可实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 全向高效能量采集, 结构紧凑、空间利用率高、可靠性强。实验结果显示, 在不同初始夹角下, 发电机稳定后的输出电压均可达到约29 V, 输出功率稳定在830 μW 左右, 平均功率密度高达29 340 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 。当外部激励方向与悬臂梁初始方向垂直时, 传统线性压电发电机基本失效, 而本文发电机仍能通过自适应调节恢复至最佳工作状态。本文提出的仿生全向自适应压电振动发电机对提升压电振动发电机的转换效率、解决低功耗微纳器件的自供电问题提供了重要的理论和技术参考。

关键词: 压电振动发电机; 全向自适应调节机理; 仿生设计; 动力学特性; 自供电问题

基金项目: 国家自然科学基金(No.52475611); 浙江省自然科学基金(No.LY24E070002)

中图分类号: TN712

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)06-2706-21

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20251011

Hummingbird Hawkmoth-Inspired Omnidirectional Adaptive Piezoelectric Vibration Generator

PAN Xingyu^{1,2}, WANG Yangyang^{1,2}, ZHANG Jiahao^{1,2}, WANG Guangqing^{1,2*}

(1. School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. Sussex Institute of Artificial Intelligence, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: With the rapid development of the Internet of Things, the power supply problem for vast numbers of low-power micro/nano devices, such as wireless sensor nodes, has become increasingly prominent. Conventional battery-based power supply faces challenges including frequent replacement, high maintenance costs, and serious environmental pollution, making self-powered technologies a current research hotspot. Piezoelectric vibration energy harvesters exhibit great potential in solving the self-powering issue of low-power devices owing to their high energy density, simple structure, and ease of integration. Inspired by the strong stability regulation capability demonstrated by the hummingbird hawk-moth during hovering flight, this paper proposes a bio-inspired passive omnidirectional adaptive piezoelectric vibration energy harvester. The harvester consists of a rotating component formed by a deep groove ball bearing and a piezoelectric cantilever beam installed at the center of the rotating component. The up-and-down bending vibration of the cantilever beam mimics the flapping of the hummingbird hawk-moth's wings, while the adaptive rotational motion of the cantilever beam mimics the moth's adaptive hovering rotation around its center of mass, thereby achieving omnidirectional adaptive adjustment and

stability regulation and significantly enhancing adaptability to environmental vibrations from different directions. Based on the energy method, a distributed-parameter electromechanically coupled nonlinear dynamic model is established, deeply revealing the coupling behavior between the bending vibration mode and the rotational motion. Through a combination of numerical simulation and experimental testing, the adaptive orientation adjustment characteristics, stability mechanism, and dynamic response of the harvester under different initial rotational angles ranging from 0° to 360° are systematically investigated. The results demonstrate that the proposed bio-inspired omnidirectional adaptive piezoelectric vibration energy harvester can, under external excitation in any direction, passively and adaptively rotate such that the piezoelectric cantilever beam ultimately stabilizes at a position aligned with the excitation direction while maintaining large-amplitude bending vibration output. Compared with traditional fixed or array-type multidirectional piezoelectric energy harvesters, the proposed harvester requires neither multiple cantilever beam combinations nor complex irregular structures; it achieves efficient omnidirectional energy harvesting from 0° to 360° using only a single piezoelectric cantilever beam, featuring a compact structure, high space utilization, and strong reliability. Experimental results show that under different initial included angles, the stabilized output voltage of the harvester reaches approximately 29 V, the output power stabilizes at around $830 \mu\text{W}$, and the average power density is as high as $29\ 340 \mu\text{W}/\text{cm}^3$. When the external excitation direction is perpendicular to the initial direction of the cantilever beam, traditional linear piezoelectric energy harvesters essentially fail, whereas the proposed harvester can still recover to its optimal working state through adaptive adjustment. The proposed bio-inspired omnidirectional adaptive piezoelectric vibration energy harvester provides important theoretical and technical references for improving the conversion efficiency of piezoelectric vibration energy harvesters and solving the self-powering problem of low-power micro/nano devices.

Keywords: piezoelectric vibration generator; omnidirectional adaptive hovering mechanism; biomimetic design; dynamic characteristics; self-power issue

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.52475611); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No.LY24E070002)

0 引言

物联网技术的飞速发展使得低功耗无线传感器节点得到广泛应用。据统计,在全球物联网中使用电池供电的无线传感器节点已接近 300 亿个,并预计未来几年将持续高速增长^[1]。由于终端设备尺寸和便携性等限制,物联网设备存在电池电量不充足的问题^[2];同时,海量电池的更换、维护、处理不当,将造成巨大的资源浪费和环境污染。因此,如何解决物联网中庞大数量传感器节点的自供电问题是一个巨大的挑战^[3-4]。

压电振动发电机又称压电振动俘能器/采集器,是一种利用压电陶瓷正压电效应将环境振动能量转换成电能的新型微纳能源器件,具有能量密度高、结构简单灵活、易与低功耗电子器件集成等优点^[5-6],可代替电池实现对低功耗电子器件持续自供电。常见的压电振动发电机采用固定式悬臂梁,该结构只有在环境激励方向与悬臂梁振动方向(法线方向)一致时才能有较高的功率产出,而环境激励具有方向随机性的特点,压电悬臂梁的振动方向无法时刻适配环境激励方向,使得压电振动发电机的能量转换效率大幅降低^[7-8]。因此,需要探索多方向或全向压电振动发电机以自适应环境振动的定向信息,从而提高其综合输出性能,这已成为该领域研究热点。Dai 等人^[9]研制

了一种由八个狭缝效应实现的摩擦纳米发电机组成的多向能量俘能器,每个狭缝效应启用的摩擦发电机间隔 45° 且固定在环上,以增强风能俘获的方向响应。Liang 等人^[10]开发了一种具有弹簧辅助多层结构的球形摩擦发电机,用于收集多向水波能量。Zhang 等人^[11]开发了一种基于流激振动效应的多向风能转换装置,该装置被设计为由六个相同的摩擦发电机组包围。Wen 等人^[12]提出了一种由八个能量转换单元组成的花状摩擦电发电机,用于收集不同运动方向的海浪能量,需要具有多自由度的弹性振荡器通过碰撞和耦合结构实现了多向均匀灵敏度。Gu 等人^[13]开发了一种由双稳态电位曲线产生的杯状结构的电磁多向能量采集器。由于这种非线性发电机的特殊对称配置,可以观察到,其从低频振动中获取多向能量的良好工作性能。Yang 等人^[14]制造了一种摩擦电-电磁混合能量采集器,利用磁球在平面方向上的摆动和滚动来实现多方向能量采集。Shih 等人^[15]提出了一种风力驱动的摩擦电发电机,通过使向四个方向弯曲的介电膜颤动来获取不同方向的风能。Caetano 等人^[16]研究了一种星形压电机械能采集器,该采集器由三个不同方向的 L 形结构组成,用于采集多向振动能量。Chen 等人^[17]设计了一种具有非线性正交前三谐振模式的 M 形压电能量采集器,可以有效地从多向源中提取振动能量。Bao 等人^[18]研究了一种具有非线性

磁摆配置的压电能量采集器,利用内部共振和摆运动与梁振动的非线性耦合效应实现多向能量采集。Li等人^[19]开发了一种具有L形结构的振动能量采集装置,利用L型结构的2:1内共振来实现多模态和多方向响应。Nie等人^[20]基于L形结构的内部谐振设计了一种Stockbridge阻尼器-激励多方向压电振动能量采集器,以克服输电线路在线监测的电源挑战。Tan等人^[21]提出了一种与非线性能量器耦合的自参数内部谐振系统,以提高压电振动能量采集的动态和方向响应的工作性能。Zhang等人^[22]报道了一种具有主动谐振和多向优势的摩擦电纳米发电机,具有单摆、翻转开关和柔性环配置。这种主动共振摩擦电纳米发电机有效地获取了频率变化和方向随机变化的水波能量。Zhang等人^[23]研究了一种多方向摆式压电能量采集器,用于采集无人驾驶公交车在多个方向上的振动能量。Anurakpandit等人^[24]提出了一种受多方向扰动激励的双轴万向节摆两自由度能量采集系统。Rui等人^[25]介绍了一种具有拱形膜结构的圆柱形摆锤形摩擦电发电机,采用拱形薄膜结构设计的圆柱端,保证了转子的双向运动,实现了海洋中的多方向低频水波能量的收集。Hwang等人^[26]报道了一种梳状结构的摩擦电纳米发电机,该发电机能够采集包括人类行走、跳跃和跑步在内的多向运动。尽管上述研究在一定程度上改善了压电振动发电机的方向响应特性,但它们依然无法完全适应时变、全方位复杂物理环境下振动源的特性。例如,利用正交配置或阵列组合设计的多方向压电振动发电机输出性能受环境激励方向影响严重,当环境激励方向与阵列组合中的某些能量采集器振动方向不一致时,这些能量采集器的功能将失效,从而导致较低的功率产出与体积比。此外,这些多方向压电振动发电机需要设计复杂的器件结构,显著增加了发电机结构的复杂性和制造难度,同时降低了空间利用率和能量采集效率。在基于碰撞或者耦合机理的多自由度能量采集系统中,碰撞或耦合结构的阻尼和弹性变形会耗散部分能量,从而降低振荡器的功率输出。而在基于内谐振的能量采集系统中,由于内谐振对系统参数的高度敏感性,致使调节方法非常复杂,且失调的系统参数难以实现内谐振,从而失去多向能量收集能力。可见,上述研究虽然增加了多个特定方向的灵敏度,以实现多方向能量收集能力,但依然无法实现自适应全向振动能量的采集。

近年来,仿生设计在压电振动发电机方面得到了广泛的应用。Qian等人^[27]受捕蝇草快速变形机制启发,提出一种无磁双稳态压电能量收集器,该结构通过子梁预位移约束形成双稳态,实验表明其在9~14 Hz可

实现宽带能量收集,最大输出功率达0.193 mW。Wang等人^[28]提出一种仿生四稳态压电能量采集器,该设计受双翅目昆虫飞行的“咔嗒”机制的启发,再结合后屈曲梁的双稳态特性,构建出了四势阱系统。Fan等人^[29]提出一种受蜂鸟肌肉-翅膀协同机制启发的双振荡器协同压电能量采集器,用于高效收集10 Hz以下的超低频环境振动。Ma等人^[30]提出一种基于蜜蜂胸部振动的压电能量采集器,该研究为微小型生物载体提供了一种轻量化、高效率、生物兼容的能量采集方案,对延长昆虫电子人续航与拓展其应用场景具有重要意义。近日,科学家在研究蜂鸟鹰蛾、蚊子、蜂鸟等生物的飞行动力学机理时,发现它们具有相似的悬停稳定性调控能力,使它们在空中飞行受到任意方向的气流扰动时均能保持很好的自适应稳定性^[31-33]。基于蜂鸟悬停振动稳定现象,Wang等人^[34]设计了一种具有紧凑同轴方向调节结构的压电能量采集器,通过轴承-转轴组合结构保证压电悬臂梁与外筒绕其中心轴线自由旋转,实现自主调向能力。利用扩展的哈密尔顿原理建立了系统的机电耦合动力学方程。实验结果表明:该全向能量采集器在不同激励振幅下均能保持稳定的方向不敏感特性。然而,该动力学模型忽略了系统旋转自由度方向的动能,仅考虑弯曲自由度方向的动能,因此无法揭示系统自适应方向调节特性,仅对不同初始方向条件下采集器的稳态输出响应进行了表征,忽略了自适应方向调节的动态过程及其关键结构参数对调节性能的影响。Han等人^[35]基于蚊子翅膀拍振幅度与角度间的运动学关系,设计了一种可实现单梁旋转的压电能量采集器,通过引入旋转自由度使单一悬臂梁在多种振动方向下具备自适应调节能力。然而,建立的集总等效参数模型过于简单,难以精确刻画悬臂梁振动模态与旋转运动之间的耦合行为。此外,仅讨论了小偏转角度($0^\circ\sim 90^\circ$)情况下发电机的自适应方向特性,而忽略了非对称、大偏转角度($90^\circ\sim 180^\circ$)情形下的方向自适应响应特性和动力学行为。实际上,压电发电机在非对称、大偏转角度下的自适应方向调节特性与小偏转角度时的自适应方向调节特性截然不同。因此,进一步深入研究该类压电发电机的方向自适应调节特性具有重要意义。

在文献[34-35]的基础上,本研究受蜂鸟鹰蛾在悬停过程中展现出翅膀拍振与身体自旋的强耦合稳定性机理的启发,从生物力学层面提升了仿生设计的合理性与系统性,提出了一种仿生蜂鸟鹰蛾的无源全向自适应压电振动发电机,该发电机由深沟球轴承构成的旋转部件和安装在旋转部件中心的压电悬臂梁组成。压电悬臂梁的上下弯曲振动模仿蜂鸟鹰蛾的

翅膀上下拍振;压电悬臂梁的自适应旋转运动模仿蜂鸟鹰蛾绕质心的自适应悬停运动。基于能量法(同时考虑弯曲自由度和旋转自由度方向的动能)和拉格朗日方程建立了压电振动发电机的分布参数机电耦合动力学模型,深入解析了弯曲振动模态与旋转运动的耦合动力学行为;仿真和实验研究了压电振动发电机在不同初始旋转角度($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)条件下的自适应方向调节特性、稳定性机理和动力学特性。研究成果为提升压电振动发电机的转换效率、解决低功耗微纳器件的自供电问题提供了重要的理论和技术参考。

1 仿生全向自适应压电振动发电机结构设计和工作原理

蜂鸟鹰蛾是一种类似蜂鸟的昆虫,具有独特的外

形和超强的悬停控制飞行能力,即使在外部环境干扰的情况下,也能够任何方向上保持稳定的飞行姿态。如图 1(a)所示,蜂鸟鹰蛾在飞行时具有与其他昆虫不同的特征,翅膀在上、下拍振的同时,会随身体位置姿态进行自适应的转动。Han 等人^[33]和 Nakata 等人^[36]揭示了蜂鸟鹰蛾飞行中的特殊参数和独特的空气动力学机制,如图 1(b)和图 1(c)所示,其中扫掠角为蜂鸟鹰蛾翅膀上、下拍振的幅度,俯仰角为拍振翅膀过程中绕质心转动的角度。在飞行过程中,蜂鸟鹰蛾通过不停地上、下拍动翅膀产生前缘涡激振动和后缘涡激振动,前、后缘涡激振动产生的气压差使之获得升力。不仅如此,蜂鸟鹰蛾会随着身体所处的不同位置自适应的转动,通过后缘涡激振动和翅膀旋转产生的旋转阻力平衡外界扰动(如侧风)引起的不稳定性,从而获得稳定的悬停飞行。

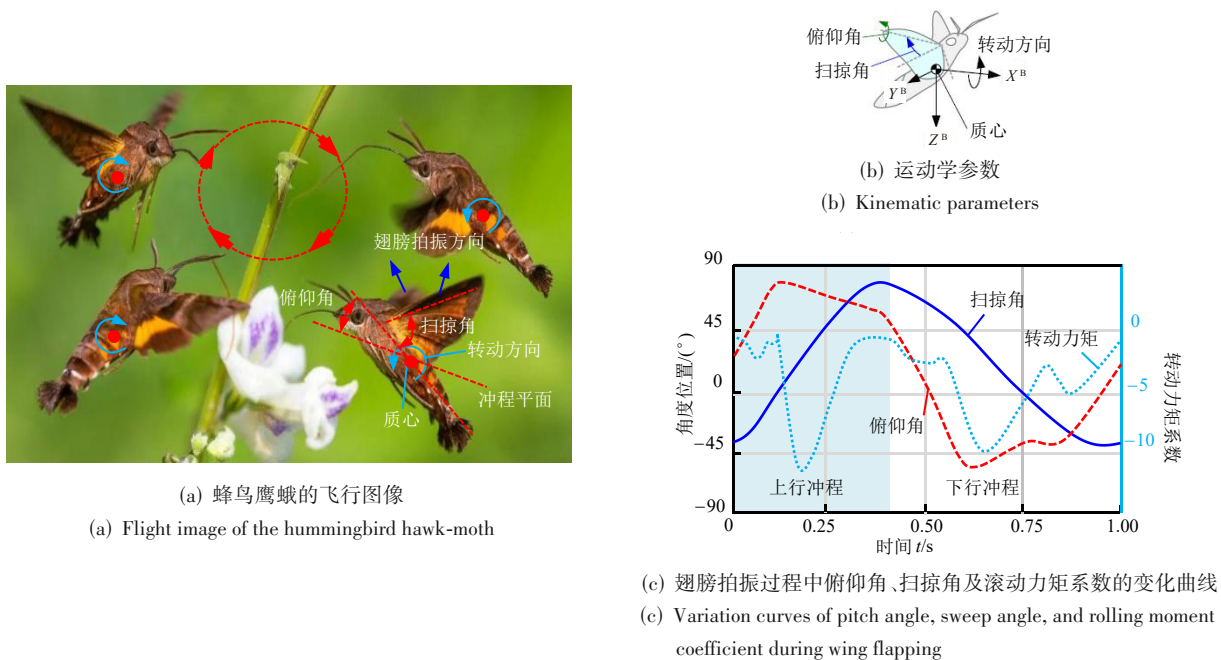


图 1 蜂鸟鹰蛾飞行机理

Figure 1 Flight mechanism of the hummingbird hawk-moth

受蜂鸟鹰蛾飞行过程中翅膀上、下拍振和自适应转动的启发,本文提出一种无源的仿生全向自适应压电振动发电机,如图 2 所示。它主要由压电悬臂梁、转动部件、基座和角度感知部件组成。压电悬臂梁由不锈钢金属基板及其根部上下表面的两个压电片和末端磁铁组成。末端磁铁一方面可以降低压电悬臂梁的固有频率,有效采集低频环境振动能量;另一方面在振动过程中产生的离心力为转动部件提供驱动能量;此外,还可以与外部磁铁组合使用,为压电悬臂梁提供非线性磁力,提升发电机的能量转换输出。

转动部件由 3D 打印的阶梯转轴和两个深沟球轴承构成;转轴较粗的一端连接压电悬臂梁,较细的一端通过两个深沟球轴承的内圈支撑,并通过联轴器与角度传感器的输出轴对中相连。整个转动部件通过调节螺母安装在基座上。在整个运动过程中,压电悬臂梁的上下弯曲振动模仿了蜂鸟鹰蛾上下拍翅的过程,压电悬臂梁的旋转运动模仿了蜂鸟鹰蛾拍翅过程中绕质心的自适应转动。目前,已有的多方向压电振动发电机为适应不同方向的振动激励,多采用多悬臂梁、多压电片组合或异形结构设计。这类方案往往导致

整体结构体积较大,且在多压电片输出时需引入复杂的电压整合电路;而异形结构虽在一定程度上可实现多方向响应,却常伴随结构复杂、加工难度高、稳定性不足等问题。相较之下,本文提出的仿生全向自适应压电振动发电机,仅采用单根悬臂梁配合旋转自适应机制,即可在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 全方向实现振动方向的自适应调节,并保持稳定的响应输出。该设计不仅结构更

为紧凑、体积显著减小,还避免了多压电片输出的电路整合问题,在简化系统的同时提升了可靠性与集成潜力。此外,无论该系统受到任何方向的外部干扰,均能够通过自适应方向调节功能,使压电悬臂梁最终稳定地悬停在与环境激励方向一致的位置,并进行大幅值的响应输出,无需任何手动干预或外部电源供给,实现无源全向自适应振动能量的采集与转换输出。

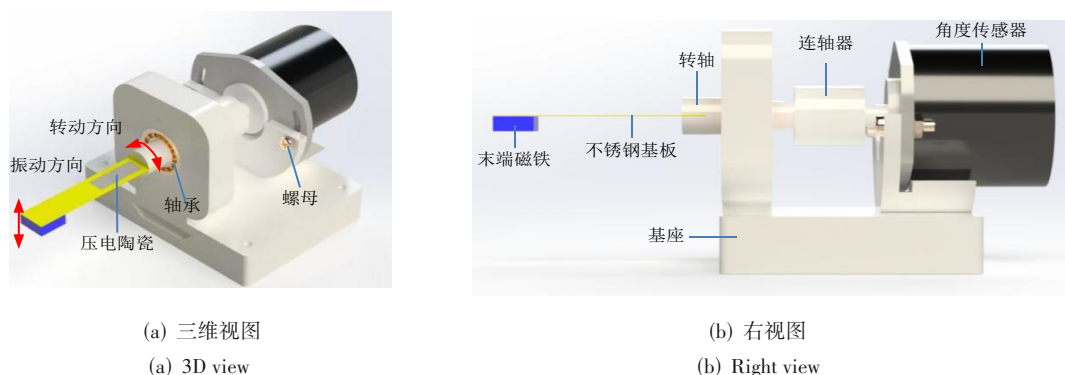


图2 仿生全向自适应压电振动发电机结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of the bio-inspired omnidirectional self-adaptive piezoelectric vibration generator

图3为仿生全向自适应压电振动发电机的工作原理示意图。如图3(a)所示,在初始状态,外部激振力与压电悬臂梁振动(法线)方向不一致,存在一个初始的夹角 θ_0 ,外部激振力沿压电悬臂梁法线方向的分力将激发压电悬臂梁产生弯曲振动。但由于此时法线方向的分力较小,压电悬臂梁的响应振动幅度较小;此外,外部激振力在压电悬臂梁切线方向的分力作用在转动部件(轴承)上使之产生旋转运动,并带动压电悬臂梁做自适应的方向调整。如图3(b)所示,随着压电悬臂梁自适应方向的不断调整,压电悬臂梁与外部激振力之间的夹角逐渐减小,外部激振力沿压电悬臂梁法线方向的分力逐渐增大,压电悬臂梁的响应振动幅度也增大。进一步进行自适应方向调整,如图3(c)所示,当压电悬臂梁的振动方向与外部激振力之间的方向角消失,即两者的振动方向一致时,激振力在悬臂梁法线方向的力达到最大,压电悬臂梁的响应输出幅度达到最大。此时,由于沿压电悬臂梁切线方向的分力为零,方向自适应旋转运动停止,悬臂梁稳定地悬停在水平位置,沿法线方向进行大幅值的弯曲振动。需要说明的是,无论该系统受到任何方向的外部干扰,均能够通过自适应方向调节功能,使压电悬臂梁最终稳定地悬停在与环境激励方向一致的位置,并进行大幅值的响应输出,无需任何手动干预或外部电源供给,实现无源全向自适应振动能量的采集与转换输出。

2 仿生全向自适应压电振动发电机的非线性耦合动力学模型

图4为仿生全向自适应压电振动发电机的受力分析图,以转轴中心 O 为坐标原点建立三维坐标系 $Oxyz$, $\theta(t)$ 为悬臂梁振动 $w(x,t)$ 与外部激励 $\ddot{y}(t)$ 之间的夹角,转轴旋转速度 $\omega_0 = \dot{\theta}(t)$ 。 $\ddot{y}(t) = A_0 \cos \omega t$ 为外部激励加速度,其中 A_0 和 ω 分别为激励加速度幅值和频率。 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 分别为悬臂梁金属基板沿法线和切线方向的速度分量; $V'_1(t)$ 和 $V'_2(t)$ 分别为末端磁铁沿法线和切线方向的速度分量; r 为末端磁铁的偏心距,即磁铁质心到悬臂梁金属基板中心的距离; $\dot{y}(t)$ 为外部激励速度。

则悬臂梁金属基板沿法线和切线方向的速度分量分别为

$$V_1(t) = \dot{w}(x,t) + \dot{y}(t) \cos \theta(t) \quad (1)$$

$$V_2(t) = \dot{w}(x,t) \dot{\theta}(t) + \dot{y}(t) \sin \theta(t) \quad (2)$$

则金属基板的合成速度为

$$V^2(t) = V_1^2(t) + V_2^2(t) \quad (3)$$

同理,末端磁铁沿法线和切线方向的速度分别为

$$V'_1(t) = \dot{w}(L,t) + \dot{y}(t) \cos \theta(t) \quad (4)$$

$$V'_2(t) = [\dot{w}(L,t) + r] \dot{\theta}(t) + \dot{y}(t) \sin \theta(t) \quad (5)$$

则末端磁体的合成速度为

$$V'^2(t) = V'^2_1(t) + V'^2_2(t) \quad (6)$$

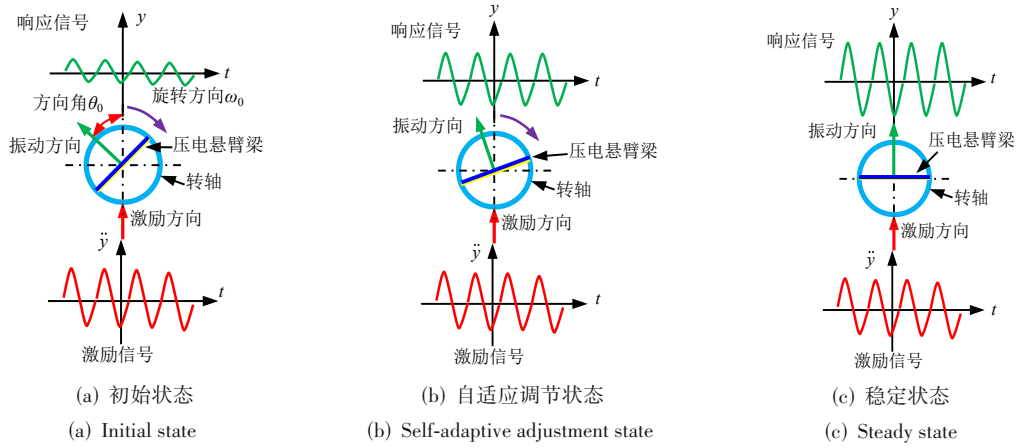


图3 仿生全向自适应压电振动发电机工作原理示意图

Figure 3 Schematic diagram of the working principle of the bio-inspired omnidirectional self-adaptive piezoelectric vibration generator

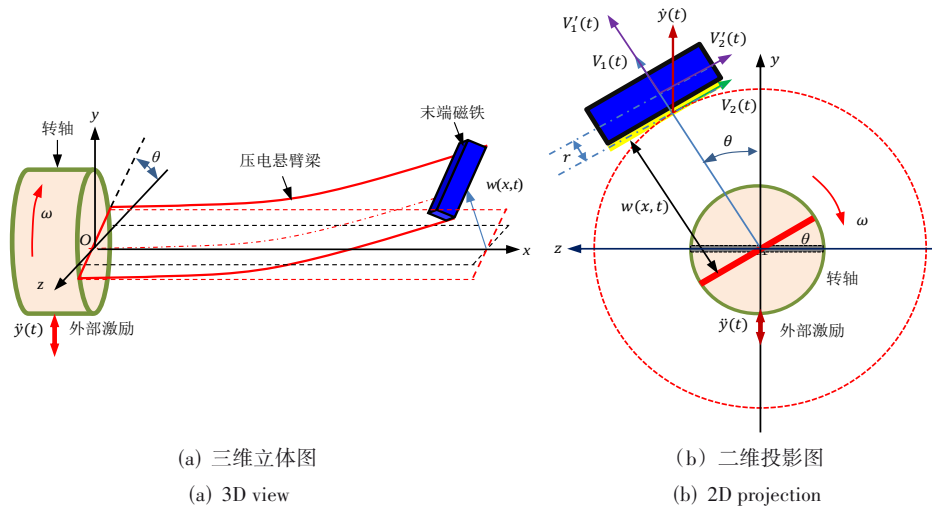


图4 压电振动发电机自适应方向调节过程中的受力分析图

Figure 4 Force analysis diagram of the self-adaptive directional adjustment process of the piezoelectric vibration generator

则系统的动能为

$$T = \frac{1}{2} (2\rho_p A_p + \rho_s A_s) \int_0^{L_p} V^2(t) dx + \frac{1}{2} \rho_s A_s \int_{L_p}^L V^2(t) dx + \frac{1}{2} M_t V'^2(t)|_{x=L} + \frac{1}{2} I_t \left(\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \partial t} \right)^2 \Big|_{x=L} \quad (7)$$

式中: ρ_s 和 ρ_p 分别为压电金属基板和压电陶瓷的密度; A_s 和 A_p 分别为压电金属基板和压电陶瓷的截面积; L 和 L_p 分别为压电悬臂梁金属基板和压电陶瓷的长度; M_t 和 I_t 分别为末端磁铁的质量和转动惯量。需要说明的是, 本文重点研究压电振动发电系统的自适应方向调节特性和关键动力学行为。两个深沟球轴承作为主要的支撑部件对压电悬臂梁起支撑固定作用, 同时将外部激励转换为旋转运动。因此, 在构建系统模型时, 可将其与环境激励一同视为压电发

电机系统的激励源。

压电悬臂梁的振动位移响应可以表示为

$$w(x,t) = \begin{cases} \varphi_1(x)q(t), & 0 < x \leq L_p \\ \varphi_2(x)q(t), & L_p < x \leq L \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\varphi_1(x)$ 和 $\varphi_2(x)$ 分别为含压电陶瓷和不含压电陶瓷部分压电悬臂梁的振型函数, $q(t)$ 为模态坐标。

将式(3)、式(6)和式(8)代入式(7), 得到系统的动能表达式:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{q}^2(t) + \frac{1}{2} M_0 q^2(t) \dot{\theta}^2(t) + \frac{1}{2} M_6 \dot{y}^2(t) + \frac{1}{2} M_1 q(t) \dot{\theta}^2(t) + \frac{1}{2} M_2 \dot{\theta}^2(t) + \frac{1}{2} M_3 \dot{q}(t) \dot{y}(t) \cos \theta(t) + \frac{1}{2} M_5 \dot{\theta}(t) \dot{y}(t) \sin \theta(t) + \frac{1}{2} M_4 q(t) \dot{\theta}(t) \dot{y}(t) \sin \theta(t) \quad (9)$$

式中,

$$\begin{aligned}
 M &= (2\rho_p A_p + \rho_s A_s) \int_0^{L_p} \varphi_1^2(x) dx + \rho_s A_s \int_{L_p}^L \varphi_2^2(x) dx, \\
 &\quad + M_t \varphi_2^2(L) + I_t \varphi_2'^2(L) \\
 M_0 &= (2\rho_p A_p + \rho_s A_s) \int_0^{L_p} \varphi_1^2(x) dx \\
 &\quad + \rho_s A_s \int_{L_p}^L \varphi_2^2(x) dx + M_t \varphi_2^2(L), \\
 M_1 &= 2M_t r \varphi_2(L); M_2 = M_t r^2, \\
 M_3 &= 2(2\rho_p A_p + \rho_s A_s) \int_0^{L_p} \varphi_1(x) dx \\
 &\quad + 2\rho_s A_s \int_{L_p}^L \varphi_2(x) dx + 2M_t \varphi_2(L), \\
 M_4 &= M_3, \\
 M_5 &= 2M_t r, \\
 M_6 &= (2\rho_p A_p + \rho_s A_s) L_p + \rho_s A_s (L - L_p) + M_t.
 \end{aligned}$$

系统的弹性势能主要考虑压电悬臂梁弯曲振动产生。由于旋转运动与弯曲振动始终垂直,因此旋转运动不引起压电悬臂梁的弯曲变形,可忽略旋转运动引起的弹性势能,则有

$$U_e = \frac{1}{2} EI_1 \int_0^{L_p} \left(\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} EI_2 \int_{L_p}^L \left(\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (10)$$

将式(8)代入式(10)得到:

$$\begin{aligned}
 U_e &= \frac{1}{2} EI_1 \int_0^{L_p} \varphi_1''^2(x) dx q^2(t) \\
 &\quad + \frac{1}{2} EI_2 \int_{L_p}^L \varphi_2''^2(x) dx q^2(t) \\
 &= \frac{1}{2} K q^2(t)
 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $K = EI_1 \int_0^{L_p} \varphi_1''^2(x) dx + EI_2 \int_{L_p}^L \varphi_2''^2(x) dx$, EI_1 和 EI_2 分别为含压电陶瓷和不含压电陶瓷部分的压电悬臂梁的弯曲刚度。

系统电势能由压电陶瓷的压电效应产生,根据压电本构方程,则有:

$$T_1 = E_p S_1 - e_{31} E_3 \quad (12)$$

$$D_3 = e_{31} S_1 + \varepsilon_{33}^s E_3 \quad (13)$$

$$E_3 = -\frac{v(t)}{2h_p} \quad (14)$$

$$S_1 = -y_0 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (15)$$

式中: T_1 和 S_1 分别为压电陶瓷的应力和应变; D_3 和 E_3 分别为压电陶瓷的电位移和电场; e_{31} 和 ε_{33}^s 分别为压电陶瓷的压电常数和介电常数; $v(t)$ 为输出电压; h_p 为

压电陶瓷的厚度; y_0 为压电陶瓷内任意一点到压电悬臂梁中心轴的距离。由式(12)~式(15)可以计算得到压电陶瓷产生的电势能:

$$\begin{aligned}
 W_p &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \int_{V_i} E_{3,i} (e_{31,i} S_{1,i} + \varepsilon_{33,i}^s E_{3,i}) dV_i \\
 &= \frac{e_{31} (h_s + h_p) b_p \varphi_1'(L_p)}{4} q(t) v(t) \\
 &\quad + \frac{\varepsilon_{33}^s L_p b_p}{4h_p} v^2(t) \\
 &= \frac{1}{2} g q(t) v(t) + \frac{C_p}{4} v^2(t)
 \end{aligned} \quad (16)$$

式中: V_i 为第 i 片压电陶瓷的体积; h_s 为金属基板的厚度; b_p 为压电陶瓷的宽度; $g = \frac{e_{31} (h_s + h_p) b_p \varphi_1'(L_p)}{2}$ 为压电陶瓷的机电耦合系数; $C_p = \varepsilon_{33}^s L_p b_p / h_p$ 为压电陶瓷等效电容。

由本构方程式(12)的右边第二项可知,压电陶瓷输出电引起的弹性势能为

$$\begin{aligned}
 U_p &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \int_{V_i} -e_{3,i} E_{3,i} S_{1,i} dV_i \\
 &= -\frac{e_{31} (h_s + h_p) b_p \varphi_1'(L_p)}{4} q(t) v(t) \\
 &= -\frac{1}{2} g q(t) v(t)
 \end{aligned} \quad (17)$$

此外,末端磁铁在旋转过程中的重心高度实时变化,由此导致的重力势能为

$$U_g = M_t g [\varphi_2(L) q(t) + r] (1 - \cos \theta(t)) \quad (18)$$

式中, g 为重力加速度。

压电振动发电机系统的非线性机电耦合动力学模型可以用拉格朗日动力学方程描述,即

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_a}{\partial \dot{q}(t)} \right) - \frac{\partial L_a}{\partial q(t)} = F_1(t) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_a}{\partial \dot{\theta}(t)} \right) - \frac{\partial L_a}{\partial \theta(t)} = F_2(t) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_a}{\partial \dot{v}(t)} \right) - \frac{\partial L_a}{\partial v(t)} = Q(t) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $L_a = T + W_p - U_g - U_e - U_p$ 为系统拉格朗日函数; $F_1(t) = -C_1 \dot{q}(t)$ 为压电悬臂梁弯曲振动的机械阻尼力; $F_2(t) = -C_2 \dot{\theta}(t) - T_c$ 为压电悬臂梁的旋转阻尼力和摩擦扭矩,其中 C_2 为旋转部件引入的切向阻尼系数, T_c 为轴承滚动摩擦、装配公差等引起的恒定阻力矩。 $\dot{Q}(t) = -v(t)/R$ 为流经负载电阻 R 的电流。

将式(9)~式(11)、式(16)和式(17)代入式(19),并忽略高阶耦合项,可以得到系统的动力学方程:

$$M\ddot{q}(t) + C_1\dot{q}(t) + Kq(t) + G_0(1 - \cos \theta(t)) - \left(M_0q(t) + \frac{1}{2}M_1\right)\dot{\theta}^2(t) - g_v(t) \quad (20a)$$

$$= -\frac{1}{2}M_3\ddot{y}(t)\cos \theta(t)$$

$$\begin{aligned} & [M_0q^2(t) + M_1q(t) + M_2]\ddot{\theta}(t) + C_2\dot{\theta}(t) \\ & + [2M_0q(t) + M_1]\dot{q}(t)\dot{\theta}(t) \\ & + G_0q(t)\sin \theta(t) + G_1\sin \theta(t) \end{aligned} \quad (20b)$$

$$= \frac{-M_4q(t) - M_5}{2}\ddot{y}(t)\sin \theta(t) - T_c$$

$$g\dot{q}(t) + \frac{1}{2}C_p\dot{v}(t) + \frac{v(t)}{R} = 0 \quad (20c)$$

式中, $G_0 = M_t g \varphi_2(L)$, $G_1 = M_t g r$ 。显然, 式(20)反映了压电发电机是一个复杂的非线性多场(运动场、重力场、离心场、电场)耦合动力学系统, 其中弯曲振动与

旋转运动之间的非线性耦合包含 $-M_0q(t)\dot{\theta}^2(t)$ 和 $(2M_0q(t) + M_1)\dot{q}(t)\dot{\theta}(t)$ 两项, 重力与弯曲振动、旋转运动之间的耦合包含 $G_0q(t)\sin \theta(t)$ 和 $G(1 - \cos \theta(t))$ 两项; 离心场与弯曲运动之间的耦合为 $G_1\sin \theta(t)$; 以及电场与弯曲振动之间的耦合 $-g_v(t)$ 和 $g\dot{q}(t)$ 。需要说明的是, 在大幅振动或极高转速下, 旋转部件的动能及弯曲-旋转之间的高阶惯性耦合通常不可忽略。但对于本文研究的低频、小振幅振动及缓慢自适应旋转过程, 这些因素为高阶小量可以忽略, 其合理有效性已通过后文的实验与仿真对比分析得到验证。

3 发电机特性仿真与实验验证

基于建立的全向自适应压电振动发电机的动力学模型, 利用龙格库塔算法在 Matlab 中仿真获得系统的动态响应输出, 用于仿真的系统参数和材料特性如表 1 所示。

表 1 传统线性与全向自适应压电振动发电机的结构参数对比

Table 1 Comparison of structural parameters between the traditional linear and the omnidirectional self-adaptive piezoelectric vibration generators

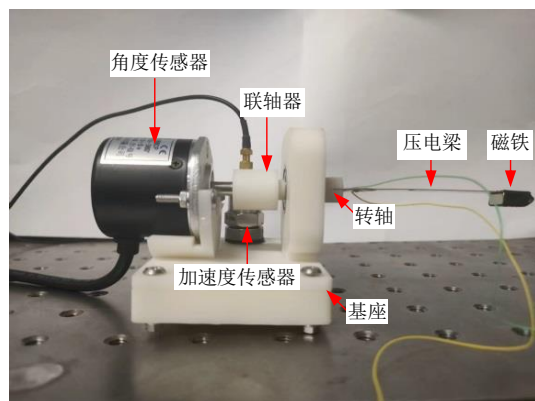
参数	取值	
	全向自适应压电振动发电机	传统线性压电振动发电机
悬臂梁基板长度 L/mm	71.5	71.5
悬臂梁基板宽度 b_s/mm	10	10
悬臂梁基板厚度 h_s/mm	0.3	0.3
悬臂梁基板密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 800	7 800
悬臂梁基板弹性模量 Y_s/GPa	206	206
PZT 宽度 b_p/mm	10	10
PZT 长度 L_p/mm	10	10
PZT 厚度 h_p/mm	0.2	0.2
PZT 密度 $\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 650	7 650
PZT 弹性模量 Y_p/GPa	62	62
介电常数 $\epsilon_{33}^s/(\text{F}\cdot\text{m}^{-1})$	1.885×10^{-8}	1.885×10^{-8}
压电应力常数 $e_{31}/(\text{C}\cdot\text{m}^{-1})$	-13.02	-13.02
末端磁铁质量 M/g	3.775	3.775
末端磁铁长度 l_m/mm	10	10
末端磁铁宽度 b_m/mm	10	10
末端磁铁高度 h_m/mm	5	5
电阻 $R/\text{M}\Omega$	1	1
偏心距 r/mm	2.65	2.65
摩擦扭矩 $T_c/(\text{N}\cdot\text{m})$	0	—
转动自由度	释放	约束

为了验证建立模型和所提方法的正确性, 按照表 1 仿真参数制作了全向自适应压电振动发电机样机, 如图 5(a) 所示, 并搭建了样机实验测试平台, 如图 5(b) 所示。压电悬臂梁基板由不锈钢片通过线切割获得, 在其根部上下表面用高强度粘结胶黏结两片尺寸、极化方向均相同的压电陶瓷片(日本富士, C6), 压电陶瓷

表面粘贴铜电极, 并通过引线与外部负载阻抗串联连接, 以便提取采集输出电压。压电悬臂梁自由端安装钕铁硼磁铁, 用于调节压电悬臂梁的谐振频率。压电悬臂梁安装在转轴中心, 并通过深沟球轴承、联轴器与角度传感器输出轴相连, 便于检测压电悬臂梁自适应旋转角度。加速度传感器安装在基座上, 用于

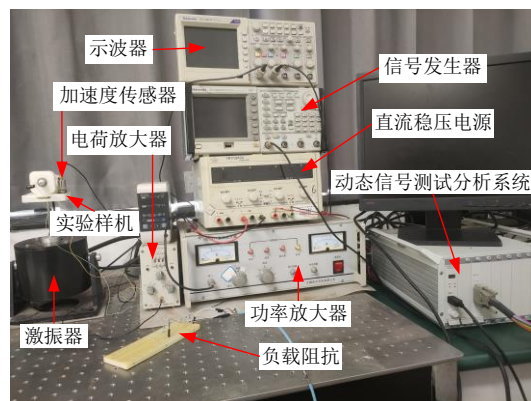
检测外部激振加速度。全向自适应发电机安装在激振器(ZJK-5)的输出轴上;信号发生器输出一定频率和幅值的谐波信号,经过功率放大器后输出给激振器,使之产生谐波振动,模拟环境振动。在此过程中,发电机随着方向的自适应调节旋转,并产生沿法

线方向的弯曲振动,悬臂梁的弯曲变形导致压电陶瓷表面因压电效应产生感应电荷,实现由机械振动能到电能的转换。动态信号分析与测试系统用于采集系统自适应过程中电压和方向响应输出波形等信号。



(a) 实验样机

(a) Experimental prototype



(b) 实验测试平台

(b) Experimental test platform

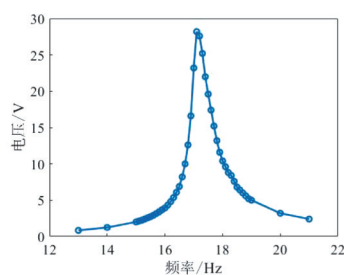
图5 实验样机与实验测试平台

Figure 5 Experimental prototype and experimental test platform

3.1 系统参数识别

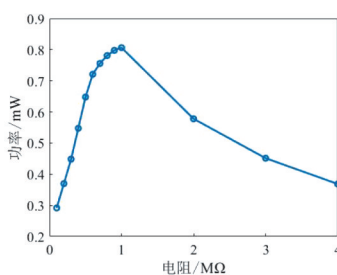
在对压电振动发电机进行动态性能仿真和实验之前,需识别发电机系统关键参数,如悬臂梁谐振频率、阻尼系数以及最优负载电阻等。本文通过对实验样机分别进行阻抗测试、扫频测试和自由振荡衰减测试等,利用获得的实验数据和实验曲线可以识别得到悬臂梁的谐振频率、机械阻尼系数和最优负载电阻。如图6所示为实验获得的压电振动发电机扫频、阻抗和自由振荡衰减曲线结果,从图6(a)的扫频曲线可得到压电悬臂梁的谐振频率为 $f_0=17.1$ Hz,与理论模

型计算得到的结果 17.2 Hz 吻合。从图6(b)的阻抗测试结果可得到发电机最优负载电阻 $R_0=1\text{ M}\Omega$,实验阻值比仿真阻值低是因为压电陶瓷存在参数偏移和焊点质量加载等导致的结构阻尼升高。在图6(c)中,取连续的 n 个振荡波,其幅值分别为 $A_i (i=1, 2, \dots, n)$,则悬臂梁的机械阻尼系数可由式 $\xi = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi(n-1))^2 + \delta^2}}$ 确定,其中 $\delta = \ln \frac{A_1}{A_n}$ 。本文取 $n=6$,测得机械阻尼系数 $\xi=0.015$,由此计算得到悬臂梁的机械阻尼 $C_1=0.0014$ 。



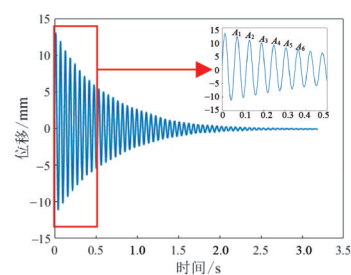
(a) 发电机扫频

(a) Frequency sweep of the generator



(b) 阻抗匹配

(b) Impedance matching



(c) 自由振荡衰减

(c) Free vibration decay

图6 系统参数识别实验测试结果

Figure 6 Experimental test results of system parameter identification

3.2 发电机方向自适应响应时间序列

为验证发电机的方向自适应响应特性,本文针对不同初始角度($\theta_0=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 和 150°)开展

了仿真与实验分析。由于结构具有方向对称性,发电机 θ_0 在 $180^\circ\sim 360^\circ$ 的性能与 $0^\circ\sim 180^\circ$ 相同,因此仅展示后者结果。图7给出了发电机在自适应调节过程中

电压响应 $v(t)$ 与转角响应 $\theta(t)$ 的时间序列输出。其中, 激振频率为 17.1 Hz, 加速度幅值为 4.88 m/s^2 , 阻尼系数 $C_1=0.0014$, $R=1 \text{ M}\Omega$, $C_2=4 \times 10^{-5}$, $T_c=0 \times 10^{-5}$ (仿真参数可由表 1 参数计算获得, 阻尼系数可通过实验测试获得)。由图 7 可知, 理论仿真结果与实验测试结果具有相同的变化趋势和较好的一致性。仿真和实验结果表明: 在不同初始夹角下, 压电振动发电机的时间序列响应出现两个明显的阶段, 即方向自适应调节阶段和稳定振动阶段。

在方向自适应调节阶段, 悬臂梁自适应调节转角响应 $\theta(t)$ 近似呈指数形式减小, 直至压电悬臂梁进入稳定振动阶段; 压电振动发电机的输出电压则呈指数形式增大, 最终达到稳定的最大值。随着初始夹角 θ_0 的增大, 如图 7(a)~图 7(f) 所示, 压电振动发电机的方向自适应调节时间逐渐增大。特别地, 当初始夹角为 $\theta_0=90^\circ$ 时, 如图 7(g) 和图 7(h) 所示, 实验结果与仿真结果存在一定的误差, 主要体现在自适应调节过程中转角响应在实验中并非立即呈现指数下降, 而是经过一段时间 (大约 0.6 s) 的停止后再进入自适应调节过程。这是由于实验中激振器存在启动瞬态, 使得激励幅值从零逐渐增至设定值, 而仿真中从初始时刻即施加稳态激励。当振动开始时, 压电悬臂梁的法线方向与外部激励方向正交垂直, 外部激励在悬臂梁法线方向的分量为零; 而切线方向的力与外部激励方向平行, 导致旋转转轴受到的驱动力矩为零, 因此压电悬臂梁的自适应方向调节过程停止。然而, 由于压电悬臂梁的振动并未停止, 而是出现非常微弱且呈增大趋势, 当振动响应增大到产生足够的离心力时, 压电悬臂梁产生的离心力迫使旋转转轴转动, 压电振动发电机开始进入自适应方向调节过程, 转角响应 $\theta(t)$ 呈指数级减小至 0; 电压响应 $v(t)$ 则逐渐增大到最大值。当初始夹角 $\theta_0>90^\circ$ 时, 如图 7(i)~图 7(l) 所示, 压电振动发电机的初始振动方向与初始夹角 $\theta_0<90^\circ$ 时的振动方向相反, 随着自适应转角响应不断减小, 振动幅值逐渐减小, 当转角响应调节到 90° 时, 压电悬臂梁的法线方向与激励方向垂直, 此时压电振动发电机的振动衰减为 0。转角响应在外部激励作用下继续自适应调节减小, 此时悬臂梁的振动方向发生翻转, 与初始夹角小于 90° 时的振动方向相同, 并随着转角响应的逐渐减小, 振动幅值逐渐增大, 直到进入稳定阶段, 压电振动发电机的振动幅值和输出电压达到最大值, 并保持恒定。

在稳定振动阶段, 压电发电机的振动幅值和输出电压始终保持在最大值, 而转角响应始终保持在 0 位置。此时, 压电振动发电机的振动方向与外部激励方向一致, 振动性能与响应输出均达到最佳状态, 全向

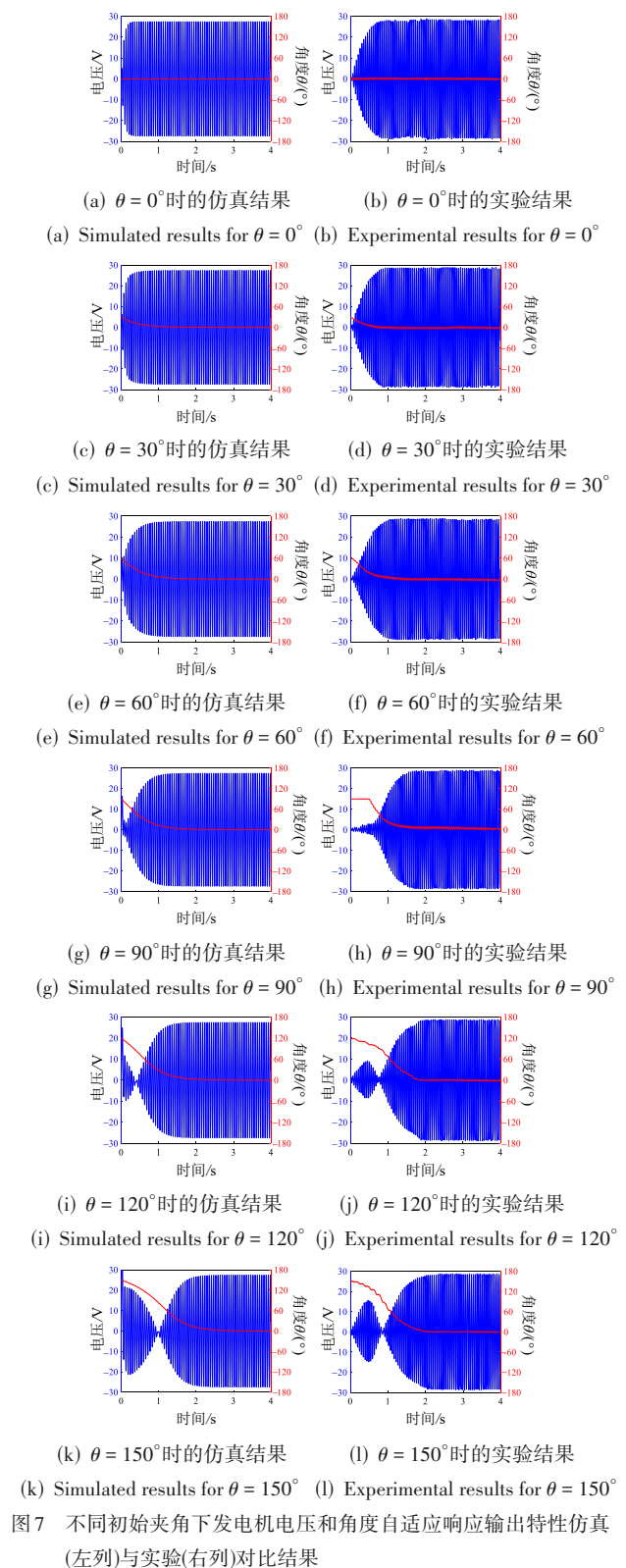


Figure 7 Comparison of simulation results (left column) and experimental results (right column) of the voltage and angle self-adaptive response output characteristics of the generator under different initial angles

自适应压电发电机表现出与常规线性压电振动发电机相同的特征。这一特征可以从理论上得到解释,对式(20)采用多时间尺度法求解,可以得到稳态时压电振动发电机的输出电压 $v(t)$ 和方向角 $\theta(t)$ 的一阶近似解分别为^[34-35]

$$\begin{cases} v(t) = \frac{fgr}{4C_p(\gamma + i\omega_0)} \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} e^{i\omega t} + \overline{ZZ} \\ \theta(t) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $f = -\frac{M_3 A_0}{2Mr}$; $\gamma = \frac{1}{RC_p}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$; $\sigma = \omega - \omega_0$ 为失谐参数,当外部激励与悬臂梁谐振频率一致时, $\sigma = 0$;

$\tau = \frac{C_1 C_p (\gamma + i\omega_0) + g^2}{2MC_p (\gamma + i\omega_0)}$; $\overline{ZZ}$ 为 $v(t)$ 表达式中第一项复数的共轭复数。由式(21)可知,全向自适应压电振动发电机的一阶近似解不受非线性项的影响。无论压电悬臂梁的初始位置 θ_0 如何,稳定时的振动位置总是相同的。当系统在稳定状态下振动时,沿法线方向的振动幅度和输出电压幅度是恒定的,频率等于外部激励频率。在切线方向上没有振动,即压电悬臂梁在稳定振动期间不旋转。这与仿真和实验得到的结果相吻合。仿真结果与实验结果之间存在误差的主要原因是样机制造和装配过程中产生的误差,这些误差在旋转转轴上产生了额外的摩擦阻尼力矩,导致振动响应下降。尽管如此,图7所示的仿真和实验结果均证明了本文方法和模型的可行性和正确性。

3.3 电特性响应输出分析

为了进一步探究全向自适应压电振动发电机的电特性,仿真和实验分析了在发电机自适应方向调节过程中的电压响应以及稳定时的最大输出电压,同时与传统线性压电振动发电机进行比较说明。传统线性压电振动发电机的具体结构如图8所示。为了提高对比分析的可靠性,除转动自由度这一变量外,其各项结构参数均与全向自适应压电振动发电机保持一致,具体数值详见表1。在同一外部激励的情况下,全向自适应压电振动发电机与传统线性压电振动发电机在不同初始夹角下的电压响应和最大输出电压对比结果如图9所示。

由图9可知,全向自适应压电振动发电机的电压响应随着自适应方向角的不同始终保持较高的输出水平,稳定后发电机的最大输出电压始终保持在29 V左右,说明全向自适应压电振动发电机具有较好的方向自适应能力,经过短暂的自适应调节阶段后,依然能使发电机达到最佳的输出效果。此外,实验获得的不同初始夹角下发电机最大输出电压和仿真结果非常吻合,进一步验证了本文方法和模型的正确性。而传统线性压电振动发电机的输出电压在很大程度上

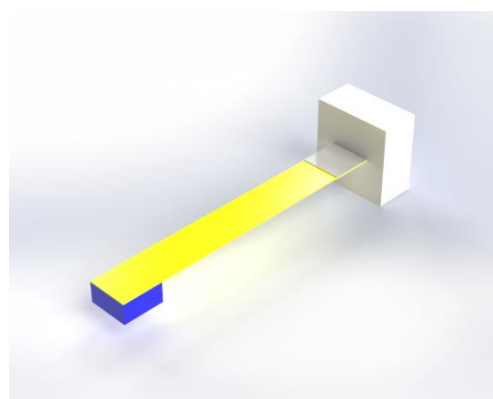


图8 传统线性压电振动发电机结构

Figure 8 Structure of the traditional linear piezoelectric vibration generator

取决于外部激励方向,且随着激励方向和振动方向之间夹角的增加而逐渐降低。当 $\theta_0 = 0^\circ$ 时,全向自适应压电振动发电机的最大输出电压达到28.6 V,与线性压电振动发电机的最大输出电压(28.2 V)接近。当 $\theta_0 = 30^\circ$ 和 150° 时,全向自适应压电振动发电机的最大输出电压达到28.7 V,而线性压电振动发电机的最大输出电压为24.3 V,前者最大输出电压为后者最大输出电压的1.2倍。当 $\theta_0 = 60^\circ$ 和 120° 时,全向自适应压电振动发电机和线性压电振动发电机的最大输出电压分别为28.6 V和14.1 V,前者最大输出电压是后者的2.0倍。当 $\theta_0 = 90^\circ$ 时,全向自适应压电振动发电机的最大输出电压为28.9 V,而传统线性压电振动发电机的输出电压接近零,线性发电机在此情形下功能基本失效。全向自适应压电振动发电机由于引入旋转自适应调节机构,有效地避免了线性压电振动发电机功能失效的问题,这表明全向自适应压电振动发电机具有良好的自适应方向动态响应输出特性。这一点可从图9中雷达图所表示的全向自适应压电振动发电机最大输出电压-方向响应的动态区域得到进一步的证明。全向自适应压电振动发电机的最大电压在不同方向的外部激励下保持稳定。雷达图中投影到动态区域的传统线性压电振动发电机的最大输出电压方向响应是顺、逆时针方向向内收缩的区域,这表明传统线性压电振动发电机的最高电压随着初始夹角的增加而降低,输出电压响应受到外部激励方向的影响。此外,传统线性压电振动发电机的动态区域始终包含在全向自适应压电振动发电机的动态区域中,这表明全向自适应压电振动发电机在多个激励方向下比线性压电振动发电机具有更好的工作性能。

进一步地,图10给出了不同初始角度 $[\theta_0 = 15(i-1), i = 1, 2, \dots, 12]$ 下自适应压电振动发电机的方向角度、输出电压和输出功率 $[P(t) = v^2(t)/R]$ 的实验结果,实验参数为:加速度幅值 $A_0 = 4.88 \text{ m/s}^2$,频率 $f = 17.1 \text{ Hz}$,负载

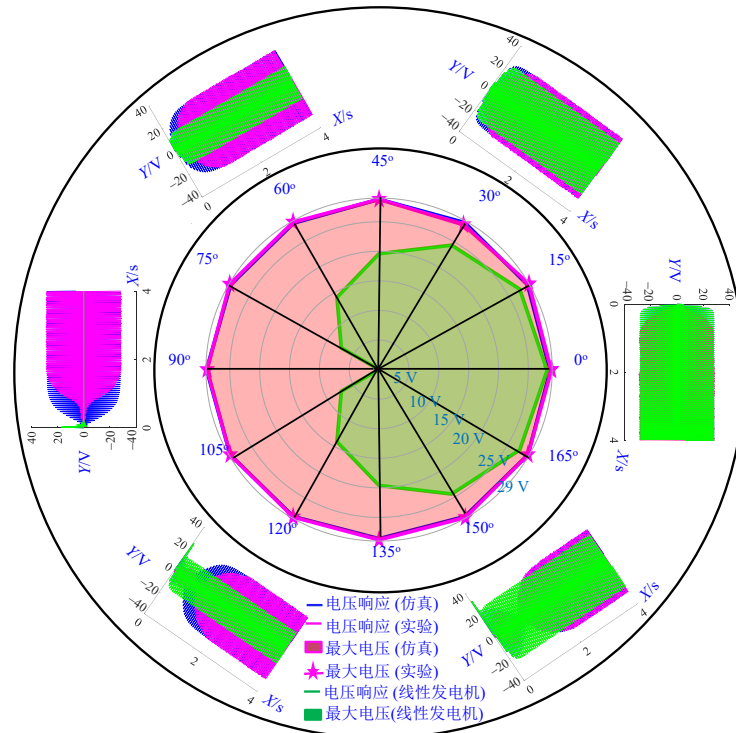


图9 自适应发电机不同初始角度下的电压响应、最大电压及其与线性压电振动发电机性能比较

Figure 9 Voltage response and maximum voltage of the self-adaptive generator under different initial angles, and performance comparison with the traditional linear piezoelectric vibration generator

电阻 $R = 1 \text{ M}\Omega$ 。图中红色实心点-虚线代表不同初始角度下压电振动发电机从自适应方向调节阶段到进入稳定振动阶段所经历的时间,箭头代表增大趋势。由图 10 的结果可知,随着初始夹角 θ_0 的增大,压电振动发电机自适应方向调节进入稳定振动阶段所需要的时间增加,如图 10(a)所示,当 $\theta_0 = 0^\circ$ 时,压电振动发电机的自适应方向调节时间为 0;当 $\theta_0 = 165^\circ$ 时,压电振动发电机的自适应方向调节时间增大到约 2 s。进入稳定振动阶段后,方向角为 0° ,压电振动发电机的输出电压稳定在 29 V 左右,如图 10(b)所示。稳定后压电发电机的输出功率稳定在 830 μW 左右,如图 10(c)所示。图 10 结果表明:无论初始夹角为何值,压电振动发电机均通过自适应方向调节功能,稳定在同一个位置,保持稳定的高水平输出电压和输出功率,以满足低功耗无线感知器件的自供电需求。同时,为更清晰地阐明本研究所提出的仿生全向自适应压电振动发电机的独特优势,表 2 从方向自适应能力、输出功率/功率密度、结构复杂度等多个维度与 Li 等人^[19]提出的一种具有 L 形结构的振动能量采集装置和 Zhang 等人^[23]提出的一种多方向摆式压电能量采集器进行了定量对比。由此可知,虽然全向自适应压电振动发电机在频带上劣于 L 形结构的振动能量采集装置,但全向自适应压电振动发电机具有更低的结构复杂度,且能够实现无源方向自适应,并能够在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 方向上产生比 L 形结构和多方

向摆式压电能量采集器更高、更稳定的输出电压和输出功率,平均功率密度高达 29 340 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 。

3.4 发电机模型假设敏感性分析

为验证发电机模型的稳健性及关键建模假设的合理性,本节对主要建模参数开展敏感性分析。鉴于本研究聚焦于发电机的全向自适应特性,悬臂梁与压电片等基本结构参数不在讨论范围内。选取对发电机自适应过程、输出电压幅值具有显著影响的参数,包括机械阻尼 C_1 、粘滞阻尼 C_2 、偏心距 r 、末端磁铁质量 M_t 、激振加速度 A_0 和激振频率 f 。需要注意的是,模型中还存在摩擦扭矩 T_c ,它主要影响发电机的稳态工作角度。在初始设定中,摩擦扭矩 T_c 值设为 0,实验结果表明:发电机可稳定回归至平衡位置 0° ,验证了该取值的合理性。但由于其标称值为 0,无法进行有效的归一化敏感系数计算,因此未纳入本节敏感性分析范围,该参数的详细讨论将在 4.5 节中展开。分析采用单参数扰动法,即在其余参数保持标称值不变的情况下,将待分析参数在其标称值基础上增加 20%,观测发电机输出电压与自适应调节时间的变化,进而计算归一化敏感系数,以定量评估各参数对输出特性的影响程度。在分析过程中,发电机与激励初始角度统一设定为 60° ,各参数标称值如表 3 所示。归一化敏感系数计算式为

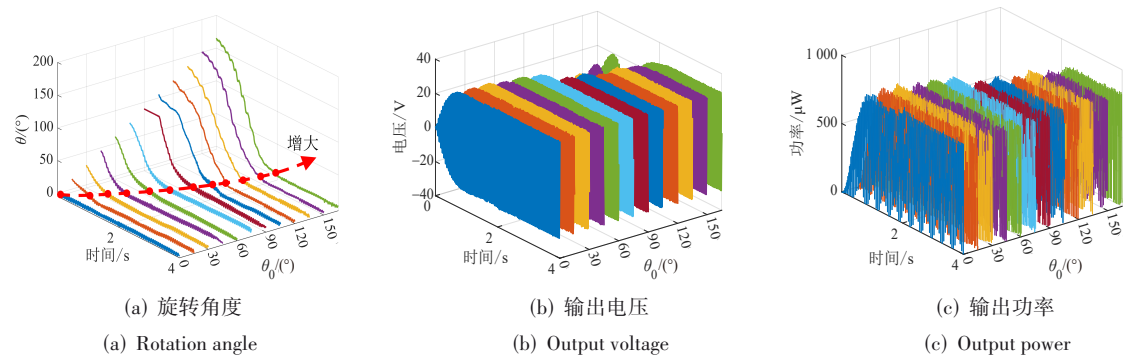


图 10 自适应发电机在不同初始夹角 θ_0 下的实验结果

Figure 10 Experimental results of the self-adaptive generator under different initial angles θ_0

表 2 全向自适应压电振动发电机与 L 形结构的振动能量采集装置、多方向摆式压电能量采集器的定向对比			
Table 2 Targeted comparison of the omnidirectional self-adaptive piezoelectric vibration generator with an L-shaped vibration energy harvesting device and a multi-directional pendulum piezoelectric energy harvester			
对比维度	全向自适应压电振动发电机	多方向摆式压电能量采集器	L 形结构的振动能量采集装置
核心机理	旋转-弯曲等多场耦合全向自适应	摆锤与磁铁同极相斥使得悬臂梁形变	L 形结构激发弯曲-扭转多模态耦合
方向自适应能力	强, 自动调节振动方向与激励方向一致	中, 摆锤可以多向摆动, 但无主动对准振动方向的能力	弱, 依靠结构多模态响应多个方向, 但无主动方向调节的能力
最佳输出电压	28.6 V	13.6 V	—
输出功率/功率密度	830 μW (稳定输出功率)、平均功率密度 29 340 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	1.233 mW (峰值功率)	平均功率 1.790 μW 、功率密度 0.691 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
工作频率特性	窄带 (谐振点 17.1 Hz)	与车辆运动有关, 未明确谐振点	宽带 (20~200 Hz 中具有多个峰值)
结构复杂度	简单, 单悬臂梁、旋转轴承、质量块	复杂, 摆锤、转台、磁铁、压电梁	复杂, L 形复合梁、多个压电片、质量块
独特优势	无源全向自适应、结构简单紧凑、输出稳定	适用于收集车辆惯性动能, 结构相对可靠	宽频响应, 能同时利用弯曲和扭转振动模式
主要局限	工作频带相对较窄	方向覆盖有限, 依赖特定运动模式	无方向自适应能力, 输出受激励方向影响大

表 3 参数的标称值	
Table 3 Nominal values of the parameters	
参数	数值
机械阻尼 C_1	$1.4 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$
粘滞阻尼 C_2	$4 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$
偏心距 r	2.65 mm
末端磁铁质量 M_l	3.775 g
激振加速度 A_0	4.88 m/s^2
激振频率 f	17.1 Hz

$$S_p = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta p/p}$$

(22)

式中, S_p 为归一化敏感系数, p 为参数, Δp 为参数变化量, Y 为输出指标, ΔY 为输出指标变化量。

图 11 展示了发电机自适应调节时间随各参数归一化敏感系数雷达图, 图 12 则为发电机输出电压幅值随各参数归一化敏感系数雷达图。图中敏感系数经归一化处理, 其正负与大小具有明确含义: 对于自适应调节时间, 负值表示参数增大可缩短调节时间 (性能提升), 正值则表示参数增大会延长调节时间 (性能降低); 对于输出电压幅值, 正值表示参数增

大可提升电压输出 (性能提升), 负值则表示参数增大会抑制电压输出 (性能降低)。敏感系数的绝对值越大, 表明该参数对相应性能指标的影响越显著。

由图 11 可知, 不同参数对发电机自适应调节时间的影响程度存在明显差异。机械阻尼 C_1 、激振加

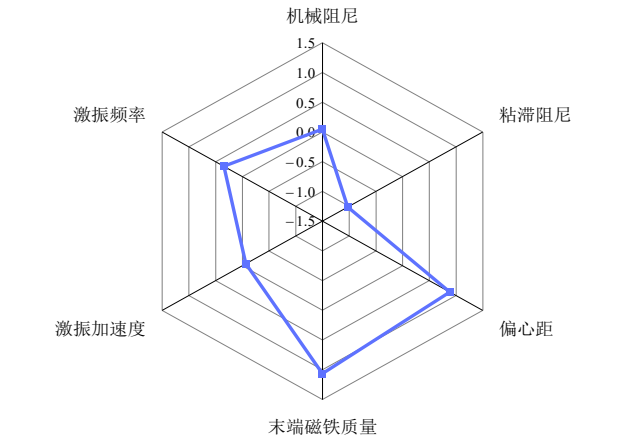


图 11 自适应调节时间的各参数归一化敏感系数

Figure 11 Normalized sensitivity coefficients of various parameters on the self-adaptive adjustment time

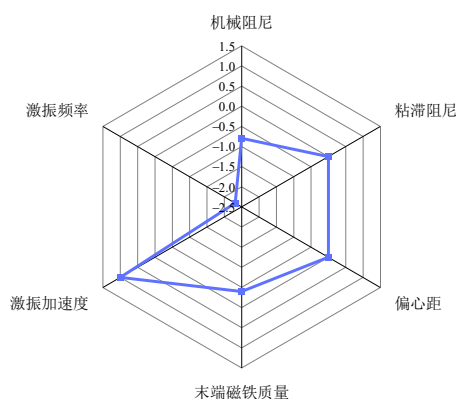


图 12 输出电压幅值的各参数归一化敏感系数

Figure 12 Normalized sensitivity coefficients of various parameters on the output voltage amplitude

速度 A_0 和激振频率 f 的影响相对有限;而粘滞阻尼 C_2 、偏心距 r 与末端质量块 M_l 的影响则较为显著。具体而言,粘滞阻尼 C_2 的增加会显著延长发电机的自适应调节时间,因此在实际工程装配中应尽量降低该参数。偏心距 r 与末端质量块 M_l 的增大则可明显缩短调节时间,但二者并非取值越大越好,具体影响将在 4.5 节中展开详细讨论。

由图 12 可知,粘滞阻尼 C_2 与偏心距 r 对发电机输出电压幅值的影响较小;而机械阻尼 C_1 、激振加速度 A_0 和激振频率 f 则对输出电压幅值具有较为显著的影响。需特别说明的是,末端磁铁质量 M_l 的改变将直接影响系统的谐振频率,进而影响发电机在当前频率下的输出电压幅值。具体而言,机械阻尼 C_1 、末端磁铁质量 M_l 的增加均会导致输出电压幅值下降:机械阻尼 C_1 增大会抑制悬臂梁的振动幅度,从而降低输出电压;激振频率 f 偏离发电机的谐振频率,亦会引起输出下降。与之相反,激振加速度 A_0 的增加

能够增大悬臂梁的振动幅度,从而有效提升发电机的输出电压幅值。

3.5 系统参数对发电机特性影响

基于参数敏感性分析结果,本节重点研究压电发电机系统参数,如外部激励加速度幅值、频率、结构阻尼、末端磁铁偏心距等因素对其动态特性的影响。图 13 为激励加速度幅值 A_0 对压电振动发电机自适应方向角、输出电压和输出功率的影响仿真结果,其中 $\theta_0 = 60^\circ$, $f = 17.1 \text{ Hz}$, $C_1 = 0.0014$, $C_2 = 4 \times 10^{-5}$, $T_c = 0 \times 10^{-5}$ 和 $R = 1 \text{ M}\Omega$ 。由图 13 所示结果可知,激励加速度幅值 A_0 对发电机自适应方向调节特性影响较小,主要影响压电振动发电机的输出电压和输出功率,随着加速度的增大,压电振动发电机的方向角和进入稳定振动阶段的时间基本保持不变,而输出电压和输出功率则明显增大。

图 14 展示了激励频率 f 对压电振动发电机自适应方向角、输出电压和输出功率的影响仿真结果,其中 $\theta_0 = 60^\circ$, $A_0 = 4.88 \text{ m/s}^2$, $C_1 = 0.0014$, $C_2 = 4 \times 10^{-5}$, $T_c = 0 \times 10^{-5}$ 和 $R = 1 \text{ M}\Omega$ 。可以看出,激励频率与激励加速度幅值一样,对压电振动发电机自适应方向调节特性影响较小,主要影响压电振动发电机的输出电压和输出功率,随着激励频率的增大,压电振动发电机的方向角和进入稳定振动阶段的时间基本保持不变,然而输出电压和输出功率则先增大后减小。在激励频率等于发电机悬臂梁谐振频率时,其输出电压和输出功率达到最大值,此后则逐渐减小。说明压电振动发电机工作在谐振状态下,输出性能达到最佳,这与传统线性压电振动发电机相似。因此,如何拓宽全向自适应压电振动发电机的工作带宽,使之具备方向和频率双重自适应能力,以便高效、宽频采集环境振动能量,是需要进一步考虑的重点问题。

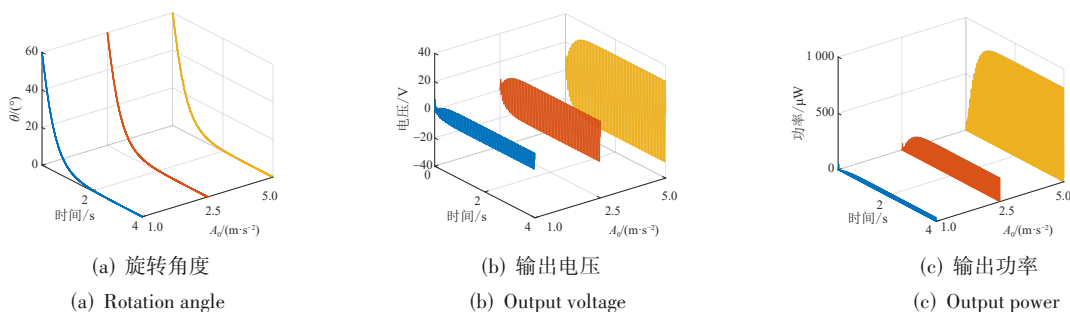


图 13 自适应发电机在不同加速度幅值下的动态响应特性

Figure 13 Dynamic response characteristics of the self-adaptive generator under different acceleration amplitudes

除了悬臂梁自身机械阻尼 C_1 外,由于旋转部件的引入,系统还存在旋转自由度方向的粘滞阻尼 C_2 。悬臂梁自身机械阻尼 C_1 主要影响悬臂梁弯曲振动的幅值,而对旋转自由度上的响应影响不大,悬臂梁自

身机械阻尼 C_1 越大,弯曲振动幅值就越小,这一点已被广泛证实。然而,旋转自由度方向的粘滞阻尼 C_2 对压电发电机系统却有着不同的影响,如图 15 所示。图 15(a)中的红色实心点虚线表示不同阻尼 C_2 下发

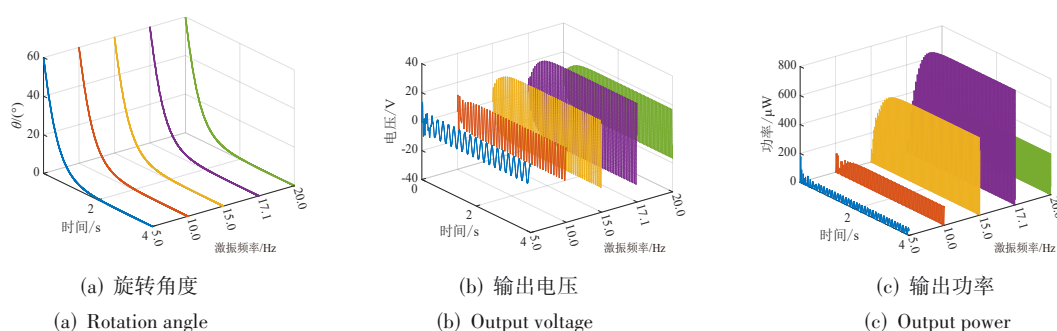


图 14 自适应发电机在不同加速度频率下的动态响应特性

Figure 14 Dynamic response characteristics of the self-adaptive generator under different acceleration frequencies

电机自适应方向调节进入稳定阶段的时间。显然,阻尼 C_2 对压电发电机的自适应方向调节阶段影响很大,随着阻尼 C_2 的不断增大,悬臂梁的方向角曲线变缓,进入稳定阶段的时间逐渐增大,表明压电发电机自适应调节时间增长。此外,由图 15(a)可知,发电机的自适应调节时间随阻尼 C_2 基本呈线性关系,即随着阻尼 C_2 的增加,自适应调节时间线性增加。尽管如此,阻尼 C_2 并不影响悬臂梁最终稳定的位置、输出电压和输出功率的幅值。如图 15(b)和图 15(c)所示,无论阻尼 C_2 如何变化,压电发电机最终的稳定位置均为 0,输出电压和输出功率均稳定在 29 V 和 830 μ W 左右。可见,阻尼 C_2 主要影响压电发电机的自适应方向调节过程,而不影响其稳定振动状态。

在旋转自由度中除了粘滞阻尼 C_2 ,还存在由轴承滚动摩擦、装配公差等引起的恒定摩擦扭矩 T_c 。图 16 展示了不同摩擦扭矩对压电振动发电机的自适应方向角度、输出电压响应和输出功率的影响。从图中可以看出,扭矩 T_c 会影响悬臂梁最终稳定的位置,进而改变稳态输出电压和输出功率的幅值。 T_c 越大,悬臂梁偏离平衡位置越远,悬臂梁振动方向上的分力就越小,稳态输出电压和输出功率幅值也就越低。当摩擦扭矩 T_c 较小时对系统旋转自适应时间的影响不大;然而,当摩擦扭矩 T_c 增大至超过悬臂梁和质量块振动产生的旋转扭矩时,系统的旋转自适应时间将显著延长,甚至导致系统完全无法实现旋转自适应。

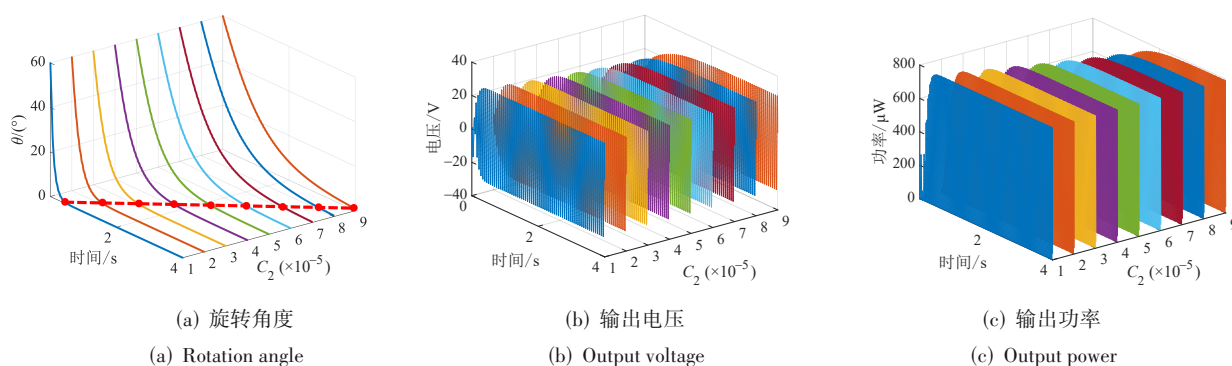


图 15 自适应发电机在不同旋转阻尼系数下的动态响应特性

Figure 15 Dynamic response characteristics of the self-adaptive generator under different rotational damping coefficients

末端磁铁质量和偏心距对压电振动发电机具有较大的影响。图 17 为不同末端磁铁质量下压电振动发电机的自适应方向角度、输出电压响应和输出功率的变化情况。由图 17(a)可知,随着末端磁铁质量的增大,发电机的自适应方向角度曲线逐渐变陡峭,自适应调节时间逐渐缩短。这表明:大的末端磁铁质量有利于压电振动发电机的自适应方向调节,使得发电机快速进入稳定振动阶段。这一现象可由式(9)和式(18)得到进一步说明,大的末端磁铁质量为悬臂梁提供了较大的离心力,使得压电悬臂梁获得较大的

旋转动力,促进了发电机的自适应方向调节。末端质量不仅影响自适应方向调节过程和时间,还影响发电机稳定阶段的输出性能,如图 17(b)和图 17(c)所示,随着末端质量的增加,发电机稳定时的输出电压和输出功率均呈现先上升后下降的变化趋势,表明存在一个最佳的末端质量使得发电机的输出性能达到最佳。这主要是由于末端质量的改变,导致悬臂梁的谐振频率($\omega_0 = \sqrt{K/M}$)发生改变,当外部激励频率偏离悬臂梁谐振频率时,发电机的动力学特性和电输出特性将大大减小。当且仅当外部激励频率与悬臂梁谐振频

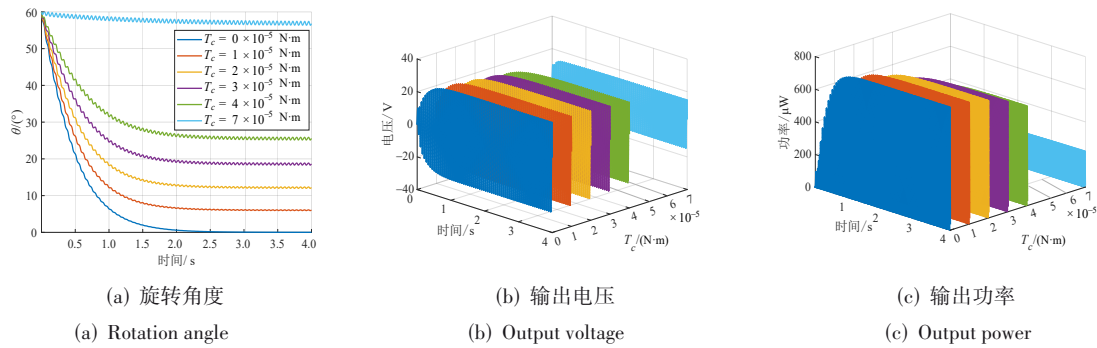


图 16 自适应发电机在不同摩擦扭矩下的动态响应特性

Figure 16 Dynamic response characteristics of the self-adaptive generator under different friction torques

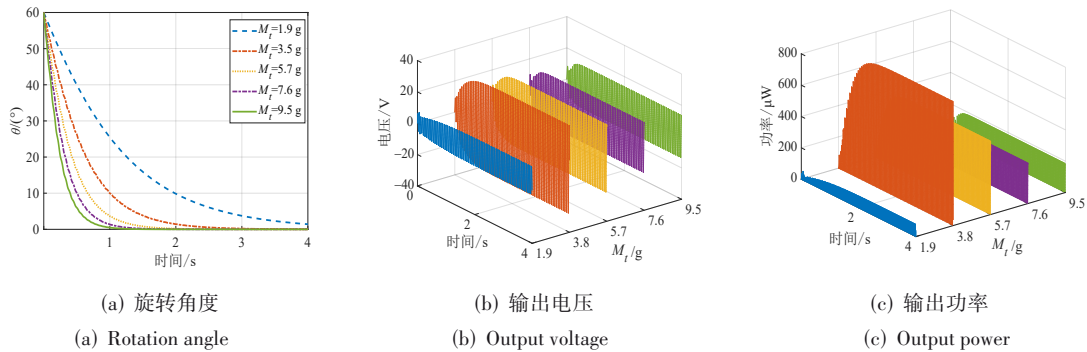


图 17 自适应发电机在不同末端质量下的动态响应特性

Figure 17 Dynamic response characteristics of the self-adaptive generator under different tip masses

率一致时,即当 $M_t=3.8\text{ g}$ 时,发电机进入稳定振动阶段时的输出性能(压电和输出功率)达到最大。

图 18 展示了末端磁铁偏心距对压电发电机的自适应方向角、输出电压和输出功率的影响结果。当偏心距较小时,如 $r=0.1\text{ mm}$ [如图 18(a)],偏心质量产生的离心驱动力矩较小,可以忽略不计;而偏心质量产生的重力力矩远大于离心驱动力矩,此时,悬臂梁的转动主要取决于重力力矩的大小,由于重力力矩的方向与悬臂梁自适应方向相反,导致悬臂梁在重力力矩的作用下,自适应方向反向增大,直到接近 180° 为止。如图 18(b)和图 18(c)所示,当偏心距较小时,悬臂梁在整个反向自适应过程中,悬臂梁的振动响应先是由大减小到零,然后再由零逐渐增大到稳定值。在这一过程中,悬臂梁的振动方向发生了一次翻转,当方向角反向自适应调节到 90° 时,悬臂梁的振动方向开始发生翻转,此时,由于外部激励与悬臂梁振动方向垂直,悬臂梁的振动响应输出停止,输出电压和输出功率减小到零。当质量偏心距 $r\geq 1\text{ mm}$ 时,随着偏心距 r 的增大,悬臂梁自适应方向调节进入稳定振动阶段的时间呈指数形式逐渐减小,并且输出电压和输出功率则呈指数形式逐渐增大。这主要是由于当质量偏心距较大时,质量偏心产生的离心力矩远大于其重力产生的力矩,悬臂梁的转动主要取决于末端质量

偏心产生的离心力矩。由于离心力矩方向与悬臂梁自适应角度调节方向一致,在离心力的作用下,悬臂梁自适应方向角度逐渐减小,直至进入稳定振动阶段。然而,质量偏心距不是越大越有利于悬臂梁的方向自适应调节以及输出电压与功率。如图 19 所示,当偏心距过大时,悬臂梁在稳定位置附近来回振荡,自适应方向调节进入稳定振动阶段的时间显著增加,甚至无法进入稳定振动阶段,一直处于自适应方向调节振荡阶段。综上分析,质量偏心距并不是越大越好,而是有一个合适的范围。考虑到压电振动发电机的安装尺寸和空间体积等因素,偏心距一般不超过 10 mm 。

3.6 发电机充电特性及其应用实例

为了验证发电机对低功耗电子负载(如 LED 等)供电的可行性,将发电机输出的交流电压通过标准的整流-滤波电路变换成直流电压,并对低功耗电子负载供电,如图 20(a)所示。图 20(b)展示了发电机在不同初始夹角条件下对电容($C=470\text{ }\mu\text{F}$)充电的实验结果,可以看出,不同初始夹角对电容充电时间和幅值的影响不大,发电机可以在相同的时间内使电容充电到相近的电压幅值,进一步说明发电机具有较好的方向自适应特性。图 20(c)提供了发电机对电容充电后为 LED 灯供电的应用实例,可以看出,发电机

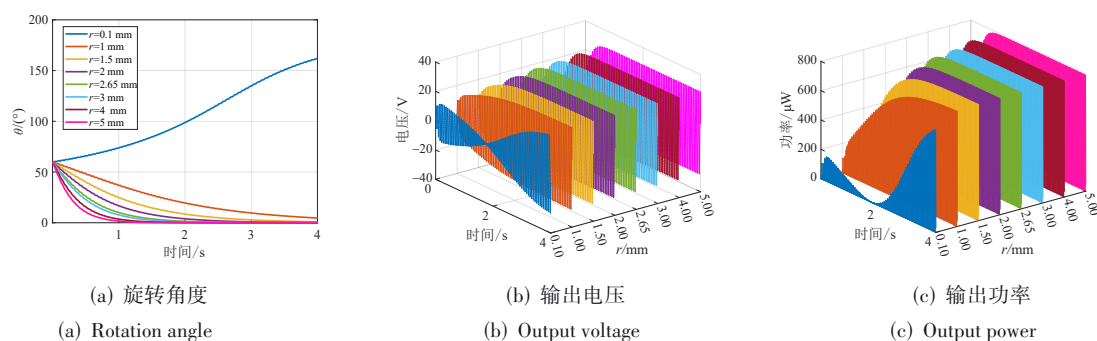
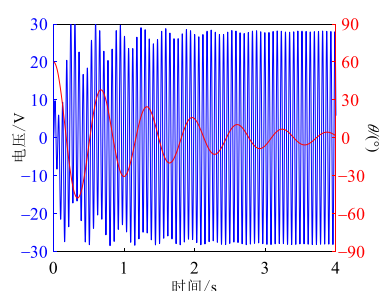


图 18 自适应发电机在不同偏心距下的动态响应特性

Figure 18 Dynamic response characteristics of the self-adaptive generator under different eccentricities

图 19 偏心距 $r = 100$ mm 时的方向角与输出电压Figure 19 Direction angle and output voltage at an eccentricity of $r = 100$ mm

的输出电能可以持续点亮多个串联连接的 LED 灯,使其正常稳定发光,表明自适应方向发电机在低功耗电子器件(如无线传感器节点、柔性可穿戴器件)的自供电方面具有较好的应用前景。

此外,研制的自适应全向压电振动发电机在旋转

设备(如风机叶片、机床转轴)、共享单车、海上浮标、汽车胎压等领域具有较好的应用前景,可为上述场景中的无线传感器提供持续的自供电。例如,在如图 21 所示的汽车轮胎压力监测系统中,压电振动发电机凭借其独特的全向自适应调节机制,可自动追踪并锁定轮胎振动的主方向,以确保在不同行驶状态下均能高效捕获振动能量。此外,发电机单悬臂梁集成旋转机构的紧凑型设计,易于嵌入轮毂有限空间内,避免了传统多方向能量采集方案体积大、结构复杂的问题。因此,该发电机能够为胎压无线传感器提供持续、稳定的电能输出,实现真正意义上的免维护、长寿命自供电,具有明确的工程应用前景。

3.7 性能比较

为了进一步验证全向自适应压电振动发电机的有效性与先进性,表 4 给出了全向自适应压电振动发电机与其他压电振动发电机/采集器的性能比较结

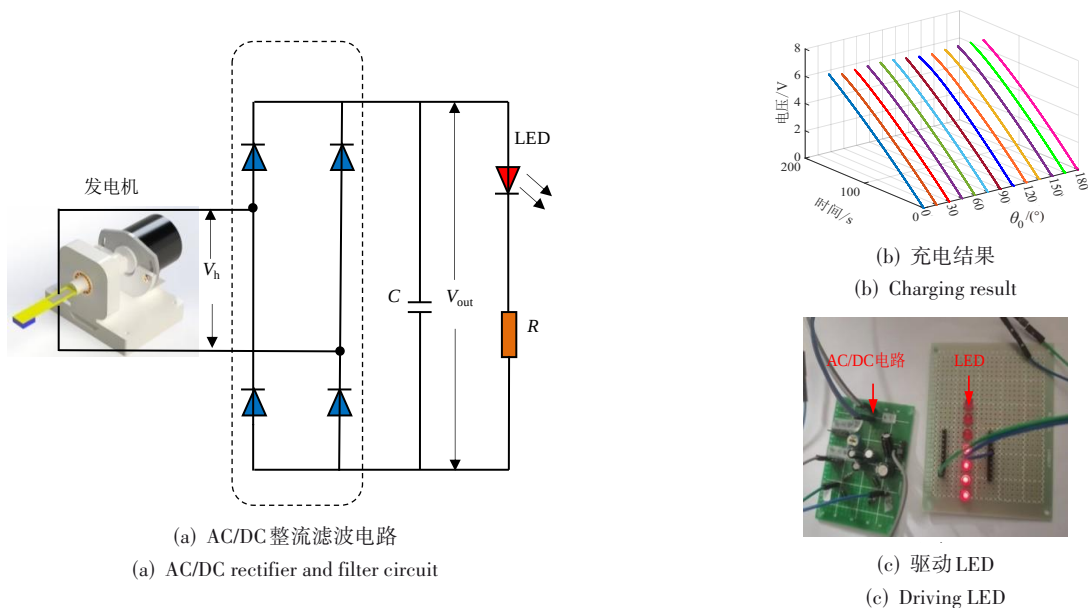


图 20 发电机充电实验及为 LED 供电实验

Figure 20 Generator charging experiment and LED powering experiment



图 21 仿生全向自适应压电振动发电机潜在应用

Figure 21 Potential applications of the bio-inspired omnidirectional self-adaptive piezoelectric vibration generator

果。表4结果表明:本文全向自适应压电振动发电机不仅结构简单,可全向自适应地采集各个方向的振动能量,还具有较高平均功率密度($29\ 340\ \mu\text{W}/\text{cm}^3$)。

与文献[37]相比,虽然平均功率密度低,但发电机采用摆式-压电阵列结构,结构复杂,不利于结构集成与能量转换管理电路的优化设计。

表 4 性能比较结果

Table 4 Performance comparison results

文献	结构类型/机理	方向自适应能力	外部激励幅值	谐振频率/Hz	平均功率密度/ $(\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3})$
文献[19]	压电双梁正交结构	$0^\circ\sim 90^\circ$	$0.7\ \text{m/s}^2$	—	0.691
文献[34]	压电仿蜂鸟悬停稳定	$0^\circ\sim 360^\circ$	1.2 mm	—	19 871
文献[35]	压电仿蚊子悬停稳定	$-90^\circ\sim 90^\circ$	$7\ \text{m/s}^2$	46.1	3 013
文献[37]	压电-电磁浮动旋转结构	海浪运动角度	海浪加速度	1.4	3.914
文献[38]	电磁-压电摆式结构	$0^\circ\sim 360^\circ$	8 mm	2	1 050
文献[39]	绳驱双梁结构	水平、垂直和纵向振动	$5\ \text{m/s}^2$	水平 10、垂直 15、纵向 15	2 500
文献[40]	摆式-压电悬臂梁阵列结构	$0^\circ\sim 360^\circ$	3 mm	12.5	11 370
文献[41]	弹簧-压电悬臂梁阵列结构	水平、垂直和纵向振动	2 mm	9.5	1.650
文献[42]	摆式-压电悬臂梁阵列结构	多方向	—	8.0	219 170
本文	压电仿蜂鸟鹰蛾悬停稳定	$0^\circ\sim 360^\circ$	$4.88\ \text{m/s}^2$	17.1	29 340

4 结论

受蜂鸟鹰蛾飞行悬停稳定机理启发,本文提出了一种全向自适应压电振动发电机结构,建立了发电机的非线性机电耦合动力学模型,仿真和实验研究了其方向自适应调节机理和动力学特性,得到以下主要结论:

(1) 仿蜂鸟鹰蛾飞行稳定性机理,在压电悬臂梁系统中,引入旋转自由度,使之在外部激励作用下自适应调节方向角,直至系统进入稳定振动阶段,为开发新型全向压电振动发电机提供了技术参考。

(2) 压电振动发电机具有两个明显的运动阶段,即方向自适应旋转调节阶段和稳定振动阶段。在方向自适应旋转调节阶段,方向角呈指数形式减小,直到进入稳定振动阶段,方向角变为 0° 。在稳定振动阶段,悬臂梁的振动响应和电输出响应均达到最大值。

(3) 初始方向角仅影响自适应旋转调节阶段的振动特性,随着初始方向角的增大,悬臂梁自适应调节进入稳定振动阶段的时间增大;激励幅值和频率仅影响稳定振动阶段发电机的响应幅值,而对方向自适应

旋转调节阶段的振动特性影响不大,随着激励幅值的增大,稳定输出的电压和功率均增大;随着频率的增大,稳定输出的电压和功率均呈现先增大后减小的变化趋势,在激励频率与悬臂梁谐振频率一致时,发电机的输出电压和功率达到最大值。

(4) 随着旋转自由度的阻尼系数增大,发电机自适应方向调节时间线性增大,但稳定时输出电压和功率基本保持不变;末端磁铁质量和偏心距对发电机的动态特性具有较大影响。末端磁铁质量越大,自适应调节时间越短,但输出电压和功率随末端质量先增大后减小的趋势;随着末端质量偏心距的增加,发电机方向自适应调节的时间减少,稳定输出电压和功率增大;对于小的偏心距,悬臂梁的方向角反向增大,在 90° 时振动方向发生翻转,输出电压和输出功率增大到最大值;对于较大的偏心距,悬臂梁自适应方向调节进入稳定振动阶段的时间大大增加,甚至无法进入稳定振动阶段,一直处于自适应方向调节振荡阶段,因此需要避免大的偏心距。

本研究的核心贡献在于提出并验证了一种新型

仿生全向自适应压电发电机,并系统阐明了其动力学行为及关键参数的影响机制。在当前阶段,研究工作重点在于验证该设计在方向自适应能力、结构可行性、理论模型准确性以及基础电输出性能方面的优势。然而,受限于单稳态悬臂梁的窄频响应特性,其输出电压幅值在非谐振频率处明显下降。

后续重点研究工作主要包括:(1)如何在保持全向自适应调节能力的同时拓展悬臂梁的工作带宽,研制具有频率和方向双重可自适应调节的新型压电振动发电机;(2)探索在不影响自适应调节机制的前提下,引入双稳态或多稳态悬臂梁结构,以增强系统在宽频随机振动环境下的能量捕获效率与输出稳定性;(3)面向实际工程需求,进一步优化发电机结构,深化结构与材料可靠性、疲劳寿命等关键技术研究,开展在工程应用场景中更具实用性的案例研究。

参考文献

- [1] IoT Analytics GmbH. State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally[EB/OL]. (2024-10-09) [2026-01-20]. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices-2024/>.
- [2] 章晋睿, 龙婷婷, 张德宇, 等. 端智能推理加速技术综述[J]. 电子学报, 2025, 53(4): 1063-1102. DOI: 10.12263/DZXB.20240691.
Zhang Jinrui, Long Tingting, Zhang Deyu, et al. On-device intelligence acceleration technologies: A survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(4): 1063-1102. DOI: 10.12263/DZXB.20240691. (in Chinese)
- [3] Zuo Jianyong, Dong Liwei, Yang Fan, et al. Energy harvesting solutions for railway transportation: A comprehensive review[J]. Renewable Energy, 2023, 202: 56-87.
- [4] Sun Yuehang, Li Yunze, Yuan Man. Requirements, challenges, and novel ideas for wearables on power supply and energy harvesting[J]. Nano Energy, 2023, 115: 108715.
- [5] Yi Zhiran, Yang Bin, Zhang Wenming, et al. Batteryless tire pressure real-time monitoring system driven by an ultralow frequency piezoelectric rotational energy harvester[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3192-3201.
- [6] Cao Yangsen, Sha Aimin, Liu Zhuangzhuang, et al. Electric energy output model of a piezoelectric transducer for pavement application under vehicle load excitation[J]. Energy, 2020, 211: 118595.
- [7] Bairagi S, Shahid-ul-Islam, Shahadat M, et al. Mechanical energy harvesting and self-powered electronic applications of textile-based piezoelectric nanogenerators: A systematic review[J]. Nano Energy, 2023, 111: 108414.
- [8] 闫晓东, 周公博. 中间梁方式下压电式能量采集器发电性能研究[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 404-414.
Yan Xiaodong, Zhou Gongbo. Study on power generation performance of piezoelectric energy harvester under intermediate beam fixed mode[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 404-414. (in Chinese)
- [9] Dai Shufen, Li Xunjia, Jiang Chengmei, et al. Omnidirectional wind energy harvester for self-powered agro-environmental information sensing[J]. Nano Energy, 2022, 91: 106686.
- [10] Liang Xi, Jiang Tao, Liu Guoxu, et al. Spherical triboelectric nanogenerator integrated with power management module for harvesting multidirectional water wave energy[J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(1): 277-285.
- [11] Zhang Xuemei, Hu Jie, Yang Qianxi, et al. Harvesting multidirectional breeze energy and self-powered intelligent fire detection systems based on triboelectric nanogenerator and fluid-dynamic modeling[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(50): 2106527.
- [12] Wen Honggui, Yang Peiyuan, Liu Guanlin, et al. Flower-like triboelectric nanogenerator for blue energy harvesting with six degrees of freedom[J]. Nano Energy, 2022, 93: 106796.
- [13] Gu Yuhan, Liu Weiqun, Zhao Caiyou, et al. A goblet-like non-linear electromagnetic generator for planar multi-directional vibration energy harvesting[J]. Applied Energy, 2020, 266: 114846.
- [14] Yang Hongmei, Deng Mingming, Zeng Qixuan, et al. Polydirectional microvibration energy collection for self-powered multifunctional systems based on hybridized nanogenerators[J]. ACS Nano, 2020, 14(3): 3328-3336.
- [15] Shin Y, Cho S, Han Sejin, et al. Omni-directional wind-driven triboelectric nanogenerator with cross-shaped dielectric film[J]. Nano Convergence, 2021, 8(1): 25.
- [16] Caetano V J, Savi M A. Star-shaped piezoelectric mechanical energy harvesters for multidirectional sources[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 215: 106962.
- [17] Chen Keyu, Gao Fei, Liu Zheyuan, et al. A nonlinear M-shaped tri-directional piezoelectric energy harvester[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(4): 045017.
- [18] Bao Bin, Zhou Shaoyi, Wang Quan. Interplay between internal resonance and nonlinear magnetic interaction for multi-directional energy harvesting[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 244: 114465.

- [19] Li Haisheng, Liu Donghuan, Wang Jianjun, et al. Broad-band bimorph piezoelectric energy harvesting by exploiting bending-torsion of L-shaped structure[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 206: 112503.
- [20] Nie Xiaochun, Tan Ting, Yan Zhimiao, et al. Ultra-wide-band piezoelectric energy harvester based on Stockbridge damper and its application in smart grid[J]. *Applied Energy*, 2020, 267: 114898.
- [21] Tan Ting, Wang Zhemin, Zhang Liang, et al. Piezoelectric autoparametric vibration energy harvesting with chaos control feature[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 161: 107989.
- [22] Zhang Chuguo, He Lixia, Zhou Linglin, et al. Active resonance triboelectric nanogenerator for harvesting omnidirectional water-wave energy[J]. *Joule*, 2021, 5(6): 1613-1623.
- [23] Zhang Tingsheng, Tang Minfeng, Li Hai, et al. A multidirectional pendulum kinetic energy harvester based on homopolar repulsion for low-power sensors in new energy driverless buses[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2022, 9(2): 603-618.
- [24] Anurakpandit T, Townsend N C, Wilson P A. The numerical and experimental investigations of a gimballed pendulum energy harvester[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2020, 120: 103384.
- [25] Rui Pinshu, Zhang Wen, Zhong Yiming, et al. High-performance cylindrical pendulum shaped triboelectric nanogenerators driven by water wave energy for full-automatic and self-powered wireless hydrological monitoring system[J]. *Nano Energy*, 2020, 74: 104937.
- [26] Hwang H J, Jung Y, Choi K, et al. Comb-structured triboelectric nanogenerators for multi-directional energy scavenging from human movements[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2019, 20(1): 725-732.
- [27] Qian Feng, Hajj M R, Zuo Lei. Bio-inspired bi-stable piezoelectric harvester for broadband vibration energy harvesting[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 222(3): 113174.
- [28] Wang Tian, Zhang Qichang, Han Jianxin, et al. Bio-inspired quad-stable piezoelectric energy harvester for low-frequency vibration scavenging[J]. *Energy*, 2023, 282: 128952.
- [29] Fan Yingying, Liu Xin, Wang D F. A hummingbird-inspired dual-oscillator synergized piezoelectric energy harvester for ultra-low frequency[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 224: 112132.
- [30] Ma Zhiyun, Zhao Jieliang, Yu Li, et al. Piezoelectric energy harvesting from the thorax vibration of freely flying bees[J]. *Cyborg and Bionic Systems*, 2025, 6: 0210.
- [31] Bomphrey R J, Nakata T, Phillips N, et al. Smart wing rotation and trailing-edge vortices enable high frequency mosquito flight[J]. *Nature*, 2017, 544(7648): 92-95.
- [32] Taha H E, Kiani M, Hedrick T L, et al. Vibrational control: A hidden stabilization mechanism in insect flight[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(46): eabb1502.
- [33] Han J S, Han J H. A contralateral wing stabilizes a hovering hawkmoth under a lateral gust[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 17397.
- [34] Wang Zhemin, Du Yu, Li Tianrun, et al. Bioinspired omnidirectional piezoelectric energy harvester with autonomous direction regulation by hovering vibrational stabilization[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 261: 115638.
- [35] Han Minglei, Yang Xu, Wang D F, et al. A mosquito-inspired self-adaptive energy harvester for multi-directional vibrations[J]. *Applied Energy*, 2022, 315(10): 119040.
- [36] Nakata T, Liu Hao. Aerodynamic performance of a hovering hawkmoth with flexible wings: A computational approach[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, 279(1729): 722-731.
- [37] Shi Ge, Zeng Wentao, Xia Yinshui, et al. A floating piezoelectric electromagnetic hybrid wave vibration energy harvester actuated by a rotating wobble ball[J]. *Energy*, 2023, 270: 126808.
- [38] Lu Linhai, Sun Huasheng, Han Lei, et al. Omnidirectional hybrid wave energy harvester for self-powered sensors in sea-crossing bridges[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115829.
- [39] Sheng Cunyong, Xiang Xiaoyi, Shen Hui, et al. A novel rope-driven piezoelectric energy harvester for multidirectional vibrations[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 3553-3562.
- [40] Wu Silei, Kan Junwu, Wu Wenchao, et al. A tunable pendulum-like piezoelectric energy harvester for multidirectional vibration[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, 41: e01094.
- [41] Li Longfei, Li Jintong, Luo Dabing, et al. A piezo-electromagnetic hybrid multi-directional vibration energy harvester in freight trains[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, 41: e00989.

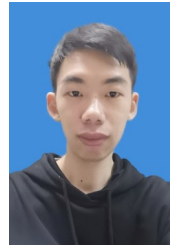
- [42] Yu Yiyong, Lin Yazhi, Liu Mingxuan, et al. A multidirectional broadband pendulum piezoelectric vibration energy

harvester utilizing magnetic potential well[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 232: 112730.

作者简介



潘兴宇 男, 2002年2月出生于浙江省台州市。现为浙江工商大学信息与电子工程学院硕士研究生。主要研究方向为压电振动能量采集器。
E-mail: 1121301189@qq.com



张家豪 男, 2000年9月出生于福建省漳州市。现为浙江工商大学信息与电子工程学院硕士研究生。主要研究方向为可穿戴式自供电传感器件。
E-mail: 24020090126@pop.zjgsu.edu.cn



王杨洋 男, 1999年1月出生于江苏省南通市。现为浙江工商大学信息与电子工程学院硕士研究生。主要研究方向为振动能量采集、机器学习。
E-mail: 2549075913@qq.com



王光庆 男, 1975年12月出生于江西省吉安市。现为浙江工商大学信息与电子工程学院长聘教授。主要研究方向为低功耗电子器件自供电技术、智能信息处理和微机器人等。
E-mail: kele76@163.com