

Exploration of the Micro-energy Harvesting Mechanism for a Piezoelectric-electromagnetic Composite Self-powered Mouse

Deyi Kong Chengbin Yuan Xinbo Fan Wenguang Zheng*

School of Mechanical Engineering & Automation University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning Province, 114051, China

Abstract

With the widespread adoption of the Internet of Things (IoT) and wireless devices, the traditional battery-powered model faces challenges such as short lifespan, heavy pollution, and high maintenance costs. Self-powered technology, which enables autonomous device operation by harvesting ambient energy, has emerged as a research hotspot in the field of sustainable energy. The piezoelectric-electromagnetic composite energy harvesting technology combines the piezoelectric effect with the principle of electromagnetic induction to efficiently capture low-frequency mechanical vibration energy, making it suitable for micro-energy supply in low-power devices such as mice. This paper explores the application mechanism of this technology in mice, analyzes its structural coupling, energy conversion, and multi-physical field synergistic effects, and proposes directions for optimized design, providing theoretical support for the development of self-powered systems for wireless peripherals.

Keywords

piezoelectric-electromagnetic composite; self-powered mouse; vibration energy harvesting; multi-physical field coupling; low-frequency mechanical energy

压电电磁复合式自供电鼠标微能量收集机制探索

孔德一 袁诚彬 范鑫勃 郑文广*

辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 中国·辽宁 鞍山 114051

摘要

随着物联网与无线设备普及,传统电池供电模式面临寿命短、污染重、维护成本高等挑战。自供电技术通过收集环境能量实现设备自主运行,成为可持续能源领域的研究热点。压电电磁复合式能量收集技术结合压电效应与电磁感应原理,可高效捕获低频机械振动能量,适用于鼠标等低功耗设备的微能量供应。本文探索该技术在鼠标中的应用机制,分析其结构耦合、能量转换及多物理场协同作用,提出优化设计方向,为无线外设自供电系统开发提供理论支持。

关键词

压电电磁复合; 自供电鼠标; 振动能量收集; 多物理场耦合; 低频机械能

1 引言

无线鼠标等便携设备依赖化学电池供电,存在续航短、废弃物污染等问题。环境振动能作为清洁能源,具有分布广泛、易于获取的优势,但单一能量转换技术(如纯压电或纯电磁)存在频带窄、效率低等局限。压电电磁复合技术通过

机械结构与电磁结构的协同设计,可拓宽工作频带并提升能量密度,成为自供电鼠标的关键解决方案。本文从技术原理、结构设计、能量转换机制、多物理场耦合及优化方向五方面展开分析。

2 技术原理与结构耦合机制

压电电磁复合技术通过悬臂梁结构实现能量耦合:末端永磁体作为公共质量块,在振动时同时驱动压电层形变与线圈磁通变化。压电部分基于正压电效应,将机械应力转化为电荷;电磁部分依赖法拉第电磁感应定律,通过磁通量变化产生电流。双稳态结构进一步增强性能,其势能曲线具有双势阱特性,使系统在低频激励下通过稳态切换扩大响应幅度,提升能量捕获效率。

【基金项目】辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目资助。

【作者简介】孔德一(2005-),本科,从事振动能量收集研究。

【通讯作者】郑文广(1981-),副教授,从事振动控制研究。

2.1 压电电磁复合技术的基础原理与能量转换路径

压电电磁复合技术的核心在于通过单一机械结构实现两种能量转换机制的协同工作，其基础原理建立在压电效应与电磁感应的物理特性之上。在悬臂梁结构中，末端永磁体作为公共质量块，其振动行为同时触发压电层与电磁线圈的能量转换过程。当外部振动施加于系统时，永磁体的运动导致悬臂梁发生弯曲形变，附着于梁表面的压电材料（如PVDF或PZT）因正压电效应产生电荷输出。正压电效应的本质是材料内部晶格在机械应力作用下发生极化，使电荷在电极表面聚集，其输出电荷量与应力大小成正比。与此同时，永磁体的振动导致其与固定线圈之间的相对位置发生变化，线圈所在区域的磁通量随之改变。根据法拉第电磁感应定律，闭合回路中磁通量的时间变化率会在线圈中产生感应电动势，进而形成电流。这一过程中，压电转换与电磁转换的能量路径相互独立，但通过永磁体的机械运动实现耦合，形成对同一振动源的双重能量捕获。^[1]

2.2 双稳态结构对能量捕获效率的增强机制

双稳态结构的引入是压电电磁复合技术提升低频能量捕获效率的关键创新。传统线性悬臂梁结构在低频振动下响应幅度有限，因其势能曲线为单势阱抛物线，系统仅能围绕单一平衡位置振动，能量转换效率受限于小振幅条件。双稳态结构通过在悬臂梁中引入预应力或非对称几何设计，使其势能曲线呈现双势阱特性，即存在两个稳定的平衡位置及一个能量势垒。当外部振动频率接近系统固有频率时，永磁体的运动可跨越势垒，在两个稳态之间切换，这种大范围运动显著放大了压电层的形变幅度与线圈的磁通变化量。

3 能量转换机制与效率提升

压电与电磁转换机制互补：压电效应对高频小振幅振动敏感，电磁感应在低频大振幅条件下效率更高。复合结构通过质量块优化与阻尼匹配，实现频带扩展。

3.1 压电与电磁转换机制的互补特性及频带扩展原理

压电效应与电磁感应在能量转换特性上的互补性是压电电磁复合技术实现宽频带能量捕获的核心基础。压电效应的本质是机械应力与电场之间的直接耦合，其输出特性高度依赖于材料的形变频率与幅度。在高频小振幅振动条件下，压电材料内部晶格的极化响应能够快速跟随应力变化，产生较高的电荷密度与电压输出。然而，当振动频率降低时，压电层的形变速度减缓，极化强度随之下降，导致输出功率显著降低。与之形成对比的是电磁感应机制，其能量转换效率与线圈中磁通量的变化率直接相关。在低频大振幅振动条件下，永磁体的位移幅度增大，线圈所在区域的磁通量变化范围扩大，即使振动频率较低，仍能通过较大的磁通变化率产生可观的感应电流。这种特性使电磁感应在低频段具有更高的能量转换效率，但高频小振幅振动下因磁通变化速率不足而输出受限。^[2]

3.2 压电材料与电磁线圈的参数协同设计及能量内耗优化

压电材料与电磁线圈的参数协同设计是提升复合系统总输出功率的关键环节。压电材料的性能参数（如压电常数、介电常数、机械品质因数）直接影响其能量转换效率。PVDF作为常用的柔性压电材料，具有较高的压电常数与良好的柔韧性，但其机械品质因数较低，能量损耗较大；PZT陶瓷材料则具有更高的压电常数与机械品质因数，但脆性较大，难以适应复杂形变。在复合结构中，需根据振动特性选择压电材料类型：对于大振幅振动，优先选用PZT以提升输出电压；对于小振幅高频振动，则选用PVDF以兼顾形变响应与耐久性。

4 多物理场耦合与仿真优化

复合系统涉及机械振动、电场、磁场的多物理场交互，需通过有限元分析（FEA）与等效电路模型进行优化。机械场方面，建立弹簧-质量-阻尼模型分析振动响应；电场与磁场通过麦克斯韦方程组描述，重点研究压电层电荷分布与线圈磁通变化的关系。耦合仿真可揭示参数（如压电片厚度、线圈匝数、磁体间距）对输出功率的影响，指导结构轻量化与集成化设计。

4.1 多物理场耦合机制与建模方法

压电电磁复合系统的能量转换过程涉及机械振动、电场与磁场的深度耦合，其核心在于通过单一机械结构实现三种物理场的动态交互。机械振动场作为能量输入的源头，通过悬臂梁的弯曲形变将外部激励转化为永磁体的运动。永磁体的位移同时触发两个关键物理过程：其一，压电层因机械应力产生形变，内部晶格极化导致电荷分离，形成电场；其二，永磁体与固定线圈的相对运动改变磁路磁阻，引发线圈所在区域的磁通量变化，进而产生感应磁场。^[3]这两种电场的生成并非独立，而是通过永磁体的机械运动形成闭环耦合：电场输出（压电效应）与磁场输出（电磁感应）共同受制于机械振动的幅度与频率，而电场与磁场之间又通过洛伦兹力等效效应产生间接反馈，影响机械振动的衰减特性。

4.2 仿真优化在结构轻量化与集成化设计中的应用

仿真优化的核心目标是通过参数化扫描与多目标优化算法，揭示压电片厚度、线圈匝数、磁体间距等关键参数对系统输出功率的影响规律，为结构轻量化与集成化设计提供理论依据。参数化扫描通过固定其他参数，逐一改变目标参数（如压电片厚度从0.1mm增至0.5mm），分析输出功率的变化趋势。结果表明，压电片厚度增加会提升电荷生成量，但同时增大形变阻力，导致高频响应下降；线圈匝数增加可扩大磁通耦合范围，但会引入过高电阻，引发焦耳热损耗。

结构轻量化设计需在保证能量捕获效率的前提下，尽

可能减少材料用量。仿真优化可通过拓扑优化技术实现：以系统输出功率为约束条件，以材料分布为设计变量，通过迭代计算去除对能量转换贡献较低的区域。例如，在悬臂梁设计中，可通过拓扑优化去除根部非关键区域的材料，形成镂空结构，在不影响振动特性的前提下降低质量。

5 结论

压电电磁复合技术通过机械-电磁结构耦合与多物理场协同，为无线鼠标自供电提供了高效解决方案。其优势在于频带拓宽、能量密度提升及环境适应性增强，但需进一步突

破材料与集成工艺瓶颈。未来研究应聚焦于智能结构设计与自适应能量管理，推动该技术从实验室向商业化应用转化，助力物联网设备实现零维护、长续航的绿色运行。

参考文献

- [1] 黄晶,申允德,成泰洪,等. 一种自供电无线鼠标的设计[J].电子世界,2017,(01):79-80.
- [2] 霍金胜. 用光电鼠标做传感器显示振动图像[J].物理实验,2014,34(03):26-28.
- [3] 陈晓春. 基于电磁共振耦合无线供电的无线鼠标研究[J].宁波职业技术学院学报,2012,16(02):1-3.