

一种基于故障监测的 MEMS 压电能量收集器

陈永军^{1,2}, 温泉^{1,2}, 周雅慧^{1,2}, 张颖异³, 贺显明^{1,2}, 温志渝^{1,2}

(1. 重庆大学 新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 微系统研究中心, 重庆 400044; 3. 中国电子科技集团公司第四十四研究所, 重庆 400060)

摘要: 为了实现对轮船发动机故障监测系统的可持续供电, 针对轮船发动机振动特性以及故障监测系统应用需求, 设计了一种基于 d_{31} 工作模式的微机电系统 (MEMS) 压电振动能量收集器。该能量收集器采用了共质量块压电悬臂梁阵列结构, 与传统单梁结构相比, 其降低了 MEMS 压电振动能量收集器的机械阻尼。通过 ANSYS 软件对结构进行了优化设计, 得到压电悬臂梁的优化尺寸为 $2.72 \text{ mm} \times 3.55 \text{ mm} \times 0.125 \text{ mm}$, 硅质量块的优化尺寸为 $14 \text{ mm} \times 8.45 \text{ mm} \times 0.575 \text{ mm}$ 。设计了器件的加工工艺流程, 并完成了芯片的制作。在加速度 $2g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$), 谐振频率 606 Hz , 最优化负载 $45 \text{ k}\Omega$ 下, 输出电压为 4.32 V , 输出功率为 $414.7 \mu\text{W}$, 能够满足故障检测系统的可持续供电需求。

关键词: 微机电系统; 压电; 振动能量收集器; 故障监测; 阵列

中图分类号: TN712; TK01 **文献标识码:** A

A MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvester Based on Fault Monitoring

CHEN Yongjun^{1,2}, WEN Quan^{1,2}, ZHOU Yahui^{1,2}, ZHANG Yingyi³, HE Xianming^{1,2}, WEN Zhiyu^{1,2}

(1. National Defense Key Discipline Lab. of Novel Micro/Nano Device & System Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Micro System Research Center of Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. 44th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In order to realize the sustainable supply of a ship engine fault monitoring system, a new type of d_{31} -based MEMS piezoelectric vibration energy harvester (PVEH) is proposed for the ship engine vibration characteristics and fault monitoring system application requirements. The PVEH consists of a sharing mass piezoelectric cantilever array structure. Compared with the conventional single beam structure, the machine damping is reduced. By using the ANSYS software for the structural optimization design, the optimized piezoelectric cantilever dimension is $2.72 \text{ mm} \times 3.55 \text{ mm} \times 0.125 \text{ mm}$ and silicon mass dimension is $14 \text{ mm} \times 8.45 \text{ mm} \times 0.575 \text{ mm}$. The fabrication process flow is designed and the chip prototype is fabricated. The device produces an output voltage of 4.32 V and output power of $414.7 \mu\text{W}$ at an optimal load of $45 \text{ k}\Omega$, an acceleration of $2g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) and a resonant frequency of 606 Hz , which meets the application requirements of the sustainable supply of the fault monitoring system.

Key words: MEMS; piezoelectric; vibration energy harvester; fault monitoring; array

0 引言

目前, 随着微机电系统 (MEMS) 和微能源技术的发展, 微型低功耗电子设备自供电在结构健康监测系统方面得到了广泛的研究^[1-3]。发动机是机械设备的核心, 保证发动机的正常运行对设备极其重要。频率测量是发动机运行状态的重要监测手段, 多数采用电子设备对其进行故障监测^[4]。对于安装

在机械内部的电子设备而言, 利用传统电池不易实现长期、可靠的供电。微型能量收集器可将电子设备外界的环境振动能转换为电能, 通过储能单元, 实现微传感节点可持续供电, 为发动机故障监测提供了一种可持续供电的解决途径。其中, 压电振动能量收集器具有体积小, 寿命长及能量密度高等优点, 是目前微型能量收集的研究热点^[5-6]。Zhou 等采用

PZT 薄膜制作的压电振动能量收集器,采用可充电电池存储能量,为低功耗器件供电,通过测量一个压电片的电导率得到结构的损伤参数,实现对结构的故障检测^[7]。

为了解决发动机故障监测系统的可持续供电问题,实现对发动机多个故障点的监测,更全面地分析发动机的振动信号,本文根据发动机正常工况下的振动特性,设计了一种与发动机正常运行振动特性一致、基于 d_{31} 工作模式的 MEMS 压电能量收集器。在发动机正常运行时, MEMS 压电能量收集器能有效地为微传感节点供电,输出振动信号,从而判断发动机运行正常;若发动机故障,其振动频率发生改变,能量收集器不能为传感微节点供电,从而判断发动机故障。

1 结构与优化

1.1 应用环境测试

针对 MEMS 压电振动能量收集器在结构健康监测中的应用需求,本文开展了基于“朝天宫号”大型船只发动机振动特性测试分析。其中,测试点的位置位于发动机缸盖前端,测试方向选择与地面垂直的竖直方向,测试结果如图 1 所示。该发动机正常工作时的振动频率范围是 600~700 Hz,加速度幅值为(2~4)g($g=9.8\text{ m/s}^2$)。由于大部分振动成分落在 610 Hz、2g,因此,本文设计的 MEMS 能量收集器谐振频率为 610 Hz,加速度为 2g。

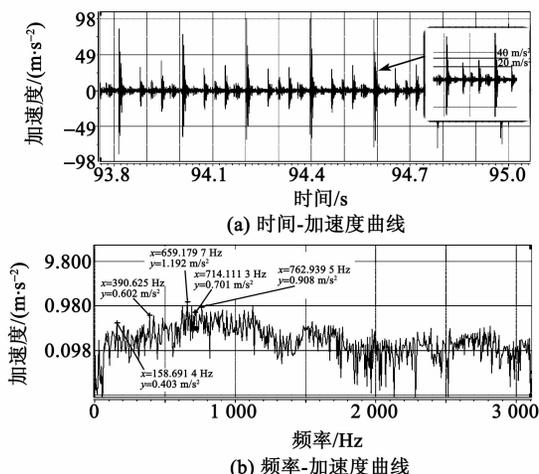


图 1 发动机振动特性曲线

1.2 结构设计

图 2 为基于 PZT 压电薄膜的 MEMS 压电振动能量收集器结构。其核心单元主要由 5 个压电悬臂梁和 1 个质量块构成。采用开缝串联结构,在不影

响输出功率的前提下,有效提高开路输出电压。压电悬臂梁单元主要包括硅衬底,上、下电极和在上、下电极之间的 PZT 压电薄膜。其中,压电悬臂梁单元之间有一定间隙,降低了机械阻尼;共用一个质量块,结构上组成串联结构,保证各个悬臂梁具有一致的振动相位,实现无损串联。

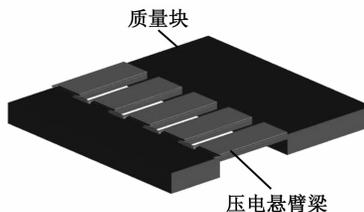


图 2 MEMS 压电振动能量收集器结构示意图

1.3 尺寸优化

图 3 为 MEMS 压电振动能量收集器的 ANSYS 有限元模型。其中,单个压电悬臂梁宽为 2.72 mm,间隙为 0.1 mm;质量块宽为 14 mm,厚度为 0.575 mm;PZT 压电薄膜厚为 4 μm ;压电悬臂梁与质量块的总体长为 12 mm。采用 ANSYS 有限元仿真软件对压电悬臂梁的长度和厚度进行优化设计。

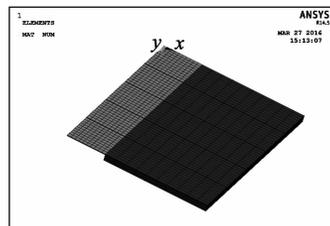


图 3 MEMS 振动能量收集器有限元模型

利用 ANSYS 软件的谐响应分析模块,分析能量收集器的输出性能。压电层选用 Solid5 单元,其他结构采用 Solid45 单元;输出功率分析时采用 Circu94 单元模拟负载电阻;PZT 压电材料的材料采用标准参数,阻尼比设为 0.003。图 4 为不同梁厚下,能量收集器频率和输出功率随梁长的变化曲线。

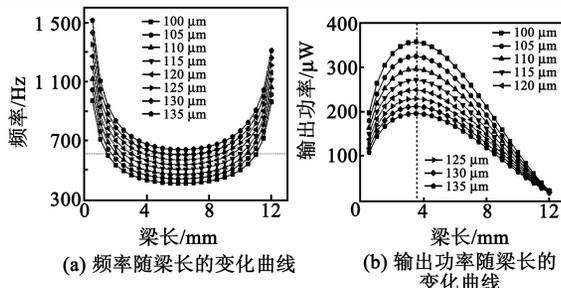


图 4 MEMS 能量收集器频率/输出功率随梁长的变化曲线

由图 4 可看出,当梁厚大于 130 μm 时,谐振频率都高于 610 Hz;梁长为 3.55 mm 时,输出功率最大,故梁厚不应大于 130 μm ,梁长设计为 3.55 mm。结合工艺间加工条件,MEMS 压电振动能量收集器的结构尺寸如表 1 所示。

表 1 MEMS 压电振动能量收集器尺寸参数

	长/mm	宽/mm	厚/ μm
悬臂梁	3.55	2.72	125
质量块	8.45	14.00	575

2 加工

理论分析表明,悬臂梁厚度对输出性能影响较大,需要精确控制,因此,加工过程中采用 SOI 硅片精确控制器件梁厚。其中,结构层厚为 125 μm , SiO_2 夹层厚为 1 μm ,支承层厚为 450 μm 。加工工艺流程如图 5 所示。

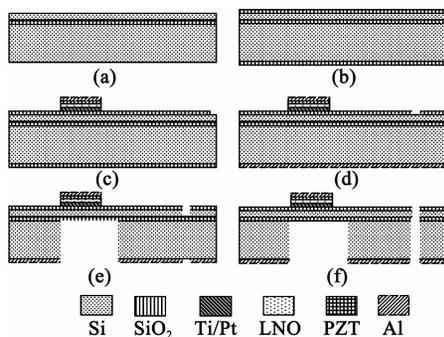


图 5 MEMS 压电能量收集器加工工艺流程图

a) 选片:采用标准 N 型(100)SOI 基片。

b) 生长 SiO_2 层:双面热氧化生长厚为 300 nm 的 SiO_2 层。

c) 制备电极:第 1 次光刻,形成下电极图形,磁控溅射 Ti/Pt 电极层(下电极),剥离工艺形成下电极;溶胶-凝胶法在 Ti/Pt 电极上制备 4 μm LaNiO_3 (LNO)/PZT 薄膜;第 2 次光刻,图形化得到 PZT/LNO 压电层,丙酮去胶;磁控溅射一层 Al 薄膜;第 3 次光刻,图形化得到 Al 上电极。

d) 第 4 次光刻,ICP 刻蚀形成悬臂梁阵列结构;BHF 湿法腐蚀 SOI 基片背面的 SiO_2 层,同时在背面溅射 Al 膜,作为 ICP 刻蚀的掩蔽层。

e) ICP 正面刻蚀至夹层 SiO_2 停止;ICP 背面刻蚀硅层,至夹层 SiO_2 停止。

f) RIE 刻蚀 SOI 夹层的 SiO_2 层,释放结构。制备的样机如图 6 所示。

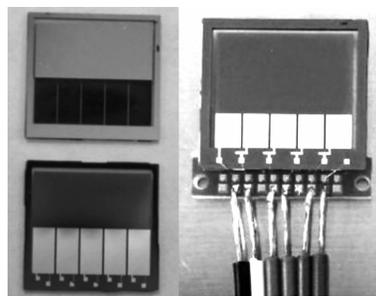


图 6 MEMS 压电能量收集器芯片照片

对每个压电悬臂梁单元的 PZT 压电复合膜进行极化,极化电场强度为 10 MV/m,极化温度为 150 $^{\circ}\text{C}$,极化时间为 30 min。为了方便说明,将样机的 5 个压电悬臂梁分别编号为 1#~5#。

3 测试与分析

MEMS 压电振动能量收集器测试系统如图 7 所示。其主要由振动单元、信号处理单元、显示单元组成。振动单元包括信号发生器、功率放大器、电磁激励振动台、加速度传感器;信号处理单元包括电荷放大器、数据采集与处理模块;显示单元包括计算机、示波器。制作的器件安装在振动台上进行振动测试,计算机和示波器分别显示输入幅值和输出电压。

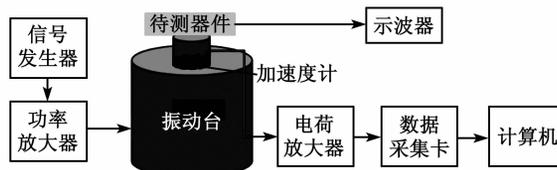


图 7 测试系统平台

图 8 为 MEMS 压电振动能量收集器开路输出电压-频率特性曲线。由图可看出,5 个压电悬臂梁开路输出电压随频率变化基本一致,谐振频率均为 606 Hz,略小于仿真结果 610 Hz,设计误差小于 0.6%,在误差许可范围以内。器件在谐振频率下分别测得 5 个压电悬臂梁的开路输出电压为 1.60 V、1.60 V、1.58 V、1.59 V、1.64 V,串联后的开路电压为 8.34 V。结果表明:器件谐振频率的实验测量值略小于仿真结果 610 Hz,设计误差小于 0.6%,说明 SOI 硅片有效地控制了梁厚;各压电悬臂梁单元在相同的频率下输出电压基本相同,制备的 PZT 压电薄膜均匀性较好;5 个悬臂梁串联后电压基本未发生损耗,证明了串联结构可有效提高开路输出电压。

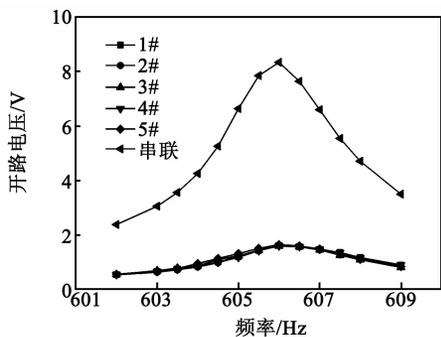


图8 MEMS 压电能量收集器开路电压-频率特性曲线

为了研究压电能量收集器的输出性能,进行了测试。图9为在加速度 2g、谐振频率 606 Hz 下,5个梁串联时输出电压和输出功率随电阻变化的曲线。由图可知,当负载为 45 kΩ 时,输出功率达到最大,为 414.7 μW,此时的输出电压为 4.32 V。

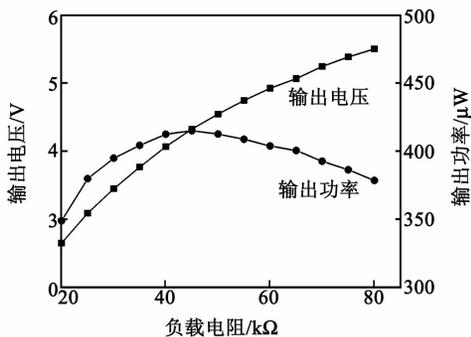


图9 MEMS 压电能量收集器串联负载特性曲线

图10为故障监测原理演示系统监测振动信号的输出曲线。由图可看出,当压电能量收集器正常工作时,监测系统在垂直方向成功采集到振动台的振动信号,说明本文设计的基于 d₃₁ 工作模式的MEMS 压电振动能量收集器在工作状态下,具有可观的输出性能,能够满足轮船发动机故障监测系统的可持续供电。

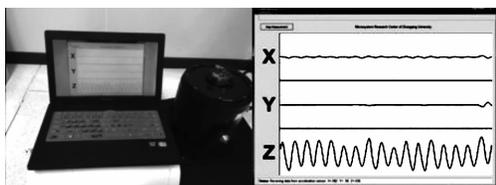


图10 故障监测原理演示系统监测振动信号的输出曲线

4 结束语

结合 MEMS 压电能量收集器在故障监测中的应用需求,本文设计了一种阵列式 MEMS 能量收集器。

实验测得:压电能量收集器的谐振频率为 606 Hz,在加速度为 2g、共振激励下,串联最大开路输出电压为 8.34 V,最优化负载下的输出电压和输出功率分别为 4.32 V 和 414.7 μW。结果表明:本文设计的 MEMS 压电阵列能量收集器能为发动机故障监测系统的可持续供电提供新的方法和思路。

参考文献:

[1] MITCHESON P D, YEATMAN E M, RAO G K, et al. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices[J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(9):1457-1486.

[2] JAFER E, IBALA C S. Design and development of multi-node based wireless system for efficient measuring of resistive and capacitive sensors[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 189(2):276-287.

[3] 刘鹏鹏, 左洪福, 付宇, 等. 航空发动机碰摩故障在线监测与诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7):1603-1608.
LIU Pengpeng, ZUO Hongfu, FU Yu, et al. Study of on-line monitoring and diagnosis of aero-engine rubbing fault[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7):1603-1608.

[4] 马书义, 武湛君, 王奕首, 等. 基于导波技术的小口径管网实时检测系统[J]. 压电与声光, 2014, 36(1):124-127.
MA Shuyi, WU Zhanjun, WANG Yishou, et al. Development of a real time inspection system for small tubes network based on guided wave technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(1):124-127.

[5] HE X F, GAO J. Wind energy harvesting based on flow-induced-vibration and impact[J]. Microelectronic Engineering, 2013, 111(11):82-86.

[6] 赵兴强, 温志渝. 基于压电材料的振动能量收集器的谐振频率调节[J]. 压电与声光, 2013, 35(2):241-244.
ZHAO Xingqiang, WEN Zhiyu. Resonant frequency adjusting of vibration energy harvester based on piezoelectric materials[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(2):241-244.

[7] ZHOU D, DONG S H, INMAN D J. A self-powered wireless sensor node for structural health monitoring [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010, 7650(9):704-712.