

基于模态分离技术的 $3 \times n$ 阵列式低频 宽带压电振动发电机的设计研究

罗翠线¹, 秦敏哲²

(1. 山西财经大学信息学院, 山西太原 030006; 2. 阿米检测技术有限公司, 江苏无锡 215000)

摘要: 针对传统压电发电机固有频率单一, 频率采集范围窄和能量采集效率低等缺陷, 且无法满足当前无线传感器在特殊工作环境中所需的宽频带和大功率输出. 本文基于模态分离技术提出了一种 $3 \times n$ 阵列式压电发电结构, 并利用 COMSOL 有限元仿真软件对其进行仿真分析, 优化参数后 3×5 阵列式采集系统在低于 50Hz 的频率范围内带宽为 15.6Hz. 实验测试结果发现 3×5 阵列式发电机的带宽拓宽至 13.8Hz; 同时在 11Hz 的共振频率下, 最优负载电阻值为 350k Ω 时, 可获得的最大输出功率为 2.12mW; 最后测试其半功率 (1.05mW) 带宽达 15.3Hz. 本文所提出的模态分离技术使阵列采集系统的带宽明显提高且输出功率增大, 这个优异的输出性能使得其在多源、宽频振动环境中具有明显的优势.

关键词: 阵列式发电机; 低频宽带采集器; 压电俘能装置; 振动能量捕获; 模态分离技术

中图分类号: TM619; TM282 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)03-0554-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.03.019

A $3 \times n$ Element Piezoelectric Vibration Generator with Low Frequency and Wide Bandwidth Exploiting Modes Separation Technique

LUO Cui-xian¹, QIN Min-zhe²

(1 College of Information, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

2. Am Incorporation for Metrology and Testing Technology Services, Wuxi, Jiangsu 215000, China)

Abstract: Traditional piezoelectric vibration generator has the defects including single natural frequency, narrow work bandwidth and low energy harvesting efficiency, which is unable to meet the wideband and high-power output requirements of wireless sensor in a special environment. A neat $3 \times n$ element energy harvester array exploiting multi-vibration modes separation technique, has been designed, fabricated, and characterized. The vibration modes of the $3 \times n$ generators have been analyzed by COMSOL software. A considerable wideband of 15.6 Hz in simulation and 13.8 Hz in experiment with 3×5 array energy harvester has been gained in a very low frequency range (below 50 Hz). Experimental results showed that the adjusted 3×5 array harvester could generate the output power of about 2.12 mW at an 11 Hz resonant frequency with the optimum load resistance 350 k Ω . Meanwhile, the half-power (1.05 mW) bandwidth could reach up to 15.3 Hz. The bandwidth and the output power of the array energy harvesting system were significantly improved by exploiting the proposed vibration modes separation technique, in which excellent output performance makes it a distinct advantage in multi-source and broadband vibration environments.

Key words: array generator; low frequency and wide bandwidth harvester; piezoelectric energy capture device; vibration energy harvesting; modes separation technique

1 引言

随着无线移动传感技术在野外环境监测和便携式

医疗器件方面的快速发展,如何在特殊环境下为其供电成为一个重要研究问题^[1].在能量采集方面,压电式振动发电机具有能量采集密度大和输出电压高等优

势^[2,3].单悬臂梁发电机因只具有一阶振动频率,能量采集频带窄,采集器工作频率范围受到限制,从环境振动中采集的能量密度小,因此无法达到无线传感器正常工作所需的功耗^[4,5].

基于上述问题,许多研究者尝试着用不同的方法来调谐发电机的工作频率,进一步拓宽发电机的输出频带^[6,7]. Al-Ashtari 等^[8]设计了一种共振频率调谐式的压电双晶片拾振结构,通过调节两个磁体之间的距离来改变两者之间的吸引力,以调谐采集装置频率. Andò 等^[9]提出了一种由双稳态振荡器结构组成的压电振动发电机,该双稳态振荡器结构能同时在悬臂梁长度轴线方向及其垂直方向的平面内采集环境振动能量. 陈仁文等^[10]提出了一种蒲公英式多方向压电能量采集结构,由一个多面球体和粘贴在其上不同自由度方向的多个悬臂梁共同组成,通过调整悬臂梁的尺寸和质量块大小让其覆盖某一振动频率范围,达到宽频且增大输出电能的效果. 但是这些方法均会降低系统的输出功率,因此利用宽频带发电机为低功耗电子产品大功率输出供能仍然具有挑战性.

本文提出了一种基于模态分离技术的新方法,拓

宽系统工作频带的同时还能增大系统的功率输出. 设计了一种基于柔性基底的 $3 \times n$ 阵列式结构,利用 COMSOL 有限元仿真软件对系统阵列的多个悬臂梁尺寸进行调整与优化,最终确定 3×5 阵列发电机的最佳参数并实际加工测试,并对结果进行对比分析.

2 $3 \times n$ 压电发电机模型建立与机理分析

图 1(a) 为 3×2 阵列式压电发电机,由一个柔性的中空矩形框架和六个大小相等的悬臂梁组成. 柔性框架结构采用 PDMS 材料,单悬臂梁结构的基底材料为铜片,压电材料为 PZT,质量块为铁块. 图 1(b) 为 3×3 阵列式压电发电机,由开有两个柔性中空矩形的框架和九个大小相等的悬臂梁组成. 图 1(c) 由开有四个柔性中空矩形的框架和十五个大小相等的悬臂梁组成,其主要的参数结构如表 1 所示. 多模态分离技术的原理如图 1(d) 所示. 当连接在柔性框架上所有悬臂梁的尺寸结构均相同时,其叠加后输出电压只在一个工作频率处达到最大值(多模态重合). 本文提出的模态分离技术通过调节单个悬臂梁的尺寸来达到模态分离的效果,使其在更宽的频带范围内都有较大的电压输出.

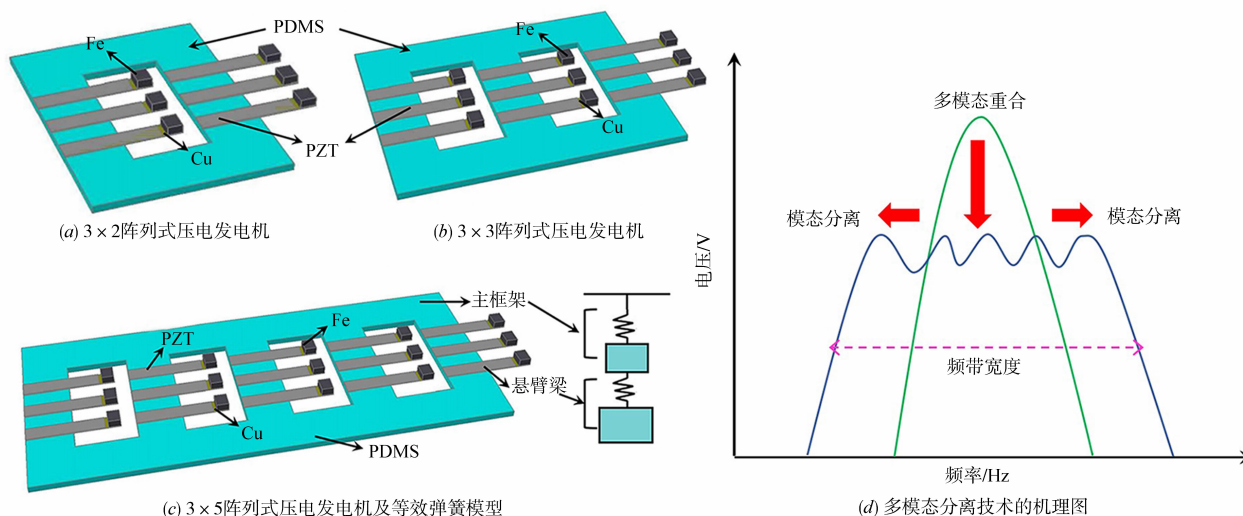


图1 $3 \times n$ 压电发电机模型及多模态分离技术机理

表 1 阵列式能量采集结构尺寸及材料

结构/材料	杨氏模量 (Gpa)	泊松比	尺寸 (mm)
3×2 阵列结构 (PDMS)	0.007	0.48	$140 \times 100 \times 4$ (外框) $80 \times 40 \times 4$ (中空矩形)
3×3 阵列结构 (PDMS)	0.007	0.48	$140 \times 170 \times 4$ (外框) $80 \times 40 \times 4$ (中空矩形)
3×5 阵列结构 (PDMS)	0.007	0.48	$140 \times 310 \times 4$ (外框) $80 \times 40 \times 4$ (中空矩形)
PZT	61	0.27	$50 \times 8 \times 0.3$
Cu	106	0.40	$60 \times 8 \times 0.5$
Fe	200	0.32	$8 \times 8 \times 5$

3 影响压电发电机宽频效果的因素分析

为使阵列式压电发电机达到模态分离,本文分别对 2×3 、 3×3 以及 5×3 阵列式压电发电机进行仿真分析.所有的阵列式结构均采用 COMSOL 软件进行仿真建模.选择分析软件中的压电模块,PDMS, Fe, Cu, PZT-5H 等材料,设定合适的阻尼参数.在固定端 Z 轴方向施加 1.0 g 的加速度.模型结构采用映射和自由四面体网格结合的方式划分来共同计算系统的频率响应及电压输出.

3.1 3×2 阵列式拾振结构有限元仿真

当所有悬臂梁的尺寸都一样时(表 2), 3×2 阵列式发电机在 11 Hz 附近有一个共振频率,如图 2 所示,仿真结果表明一阶共振频率 10.34 Hz 与二阶共振频率 10.6 Hz 几乎重合,因此图中只观察到一个峰值.当调节悬臂梁的尺寸大小时(表 2), 3×2 阵列式能量采集器的工作频率由一个电压峰值 76.21 V 变化到有两个电压峰值,分别是 51.05 V 和 47.48 V (图 2).可以看出, 3×2 阵列式发电机的一阶与二阶振动模态发生明显的分离,系统的 -3 dB 带宽由 1.1 Hz 增加到 3.3 Hz ,系统输出电压由未调整之前的最大输出电压 76.21 V 降低到调整后的 51.05 V 和 47.48 V 两个电压.分析系统的

振动特性可知(图 2 中插图),一阶振动模态主要由第二排悬臂梁的振动引起,而二阶振动模态主要由第一排悬臂梁的振动所引起.减小第二排悬臂梁的宽度,其一阶共振频率减小很小(表 2);但增大第一排悬臂梁的宽度时,其二阶共振频率由 10.86 Hz 增大到 12.51 Hz (表 2),在一阶共振频率降低和二阶共振频率增大的共同作用下,系统频带得到拓宽.其两个振动模态分离导致输出电压不再叠加,因此两个振动模态对应的输出电压均有降低,这个结果和以上提出的模态分离技术所要达到的效果一致.

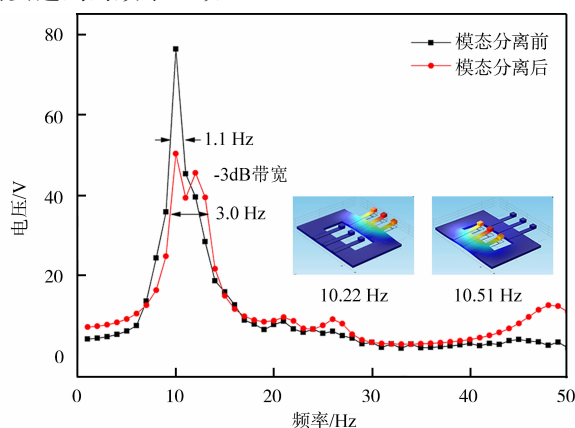


图 2 3×2 阵列式发电机模态分离前后频率-电压输出响应

表 2 3×2 阵列式发电机模态分离前后尺寸参数图

调节前	尺寸(mm)			振动模态	共振频率(Hz)
	Cu	PZT	Mass		
第二排	$60 \times 8 \times 0.5$	$50 \times 8 \times 0.3$	$8 \times 8 \times 5$	一阶	10.34
第一排	$60 \times 8 \times 0.5$	$50 \times 8 \times 0.3$	$8 \times 8 \times 5$	二阶	10.86
调节后	尺寸(mm)			振动模态	共振频率(Hz)
	Cu	PZT	Mass		
第二排	$60 \times 6 \times 0.5$	$50 \times 6 \times 0.3$	$8 \times 6 \times 8$	一阶	10.22
第一排	$60 \times 14 \times 0.5$	$50 \times 14 \times 0.3$	$8 \times 14 \times 6$	二阶	12.51

3.2 3×3 阵列式拾振结构有限元仿真

图 3(a)为 3×3 阵列式发电机结构模态分离前后的频率-电压输出响应图.可以发现当九个悬臂梁的尺寸不发生变化时(表 3),其发电机在 11 Hz 附近的输出电压为 100.43 V ;当九个悬臂梁的尺寸发生变化后(表 3),其采集器的工作频率变为 3 个,分别为 9.12 Hz 、 11.83 Hz 和 14.15 Hz .系统结构尺寸经过调整后, -3 dB 带宽由未调整之前的 1.2 Hz 增加到 6.8 Hz ,频带宽度增加了 466% .本文对于模态分离前后系统的参数变化以及影响系统共振频率的因素做了深入分析,从表 3 中发现模态未分离之前系统的前三阶共振频率分别为 11.19 Hz 、 12.41 Hz 和 12.85 Hz ,几乎接近重合;模态分离之后系统的前三阶频率明显分离开,分别是 8.86 Hz 、

11.83 Hz 和 14.15 Hz .

图 3(b)为模态分离前后对系统中每个悬臂梁的输出曲线.根据振动特性,中心轴对称两侧的两个悬臂梁的输出特性一致(序号一样),因此依次定义 9 个悬臂梁的序号分别为 1、2、3、4、5 和 6(图 3(b)中插图所示).从图 3(b)插图发现,一阶振动模态由第三排悬臂梁的振动产生,二阶振动模态由第一排悬臂梁的振动产生,而三阶振动模态由第二排悬臂梁的振动产生.当第二排悬臂梁宽度降低时,一阶共振频率由 11.19 Hz 减小到 9.12 Hz ;当第三排悬臂梁宽度增加时,二阶共振频率减小很少;当第一排悬臂梁的宽度增加时,三阶共振频率增大到 14.15 Hz .在前三阶频率的降低与升高共同作用下系统带宽增加,三个振动模态分离导致输出电压不再叠加,因此三个振

动模态对应的输出电压均有所降低. 这个结果再一次验

证了上述模态分离技术的机理.

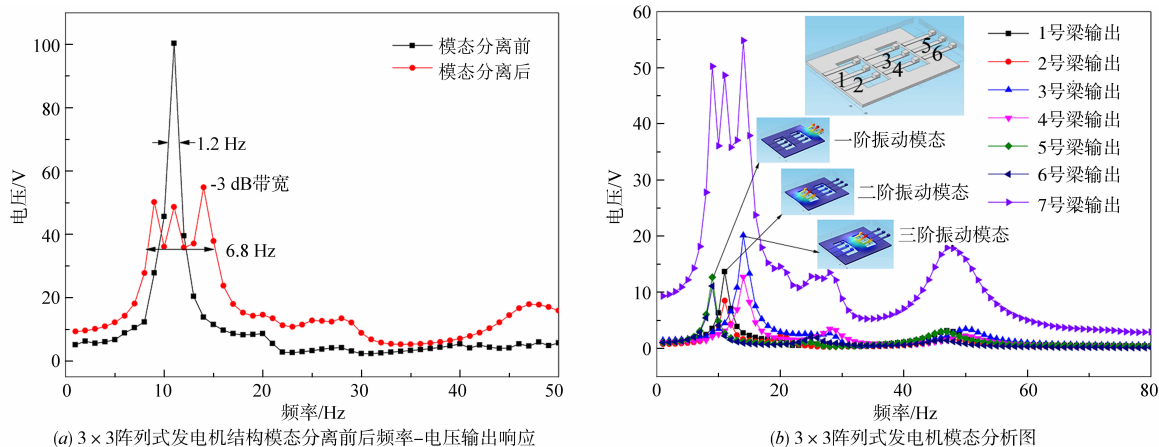


图3 3×3 阵列发电机模态分析

表 3 3×3 阵列式发电机模态分离前后尺寸参数图

调节前	尺寸 (mm)			振动模态	共振频率 (Hz)
	Cu	PZT	Mass		
第二排	$60 \times 8 \times 0.5$	$50 \times 8 \times 0.3$	$8 \times 8 \times 5$	一阶	11.19
第三排	$60 \times 8 \times 0.5$	$50 \times 8 \times 0.3$	$8 \times 8 \times 5$	二阶	12.41
第一排	$60 \times 8 \times 0.5$	$50 \times 8 \times 0.3$	$8 \times 8 \times 5$	三阶	12.85
调节后	尺寸 (mm)			振动模态	共振频率 (Hz)
	Cu	PZT	Mass		
第二排	$60 \times 3 \times 0.5$	$50 \times 3 \times 0.3$	$3 \times 8 \times 5$	一阶	9.12
第三排	$60 \times 14 \times 0.5$	$50 \times 14 \times 0.3$	$14 \times 8 \times 5$	二阶	11.83
第一排	$60 \times 14 \times 0.5$	$50 \times 14 \times 0.3$	$14 \times 8 \times 5$	三阶	14.15

3.3 3×5 阵列式拾振结构有限元仿真

对 3×5 阵列式发电机进行仿真分析, 进一步验证模态分离技术的实用性. 图 4 为 3×5 阵列式发电机结构模态分离前后的频率-电压输出响应曲线. 结合表 4 中模态分离前后的采集器结构尺寸参数, 发现当采集器的十五个悬臂梁的尺寸结构一样时, 其在 12 Hz 附近有五个共振频率, 输出电压达到 163.68 V (图 4); 当 3×5 阵列式发电机的悬臂梁参数 (PZT 宽度、质量块高度) 发生变化时, 其前五阶共振频率分别是 6 Hz、9 Hz、12 Hz、16 Hz 和 19 Hz. 从图 4 中可明显发现 3×5 阵列式发电机结构参数通过优化调节之后, 系统的 -3 dB 带宽由原来的 2.03 Hz 增加到 15.6 Hz, 带宽增加了 721%. 五阶模态分离之后系统的电压不再叠加, 因此系统的电压也由一个高数值分成五个相对较小的低数值.

通过仿真分析, 对 3×5 阵列式发电机各阶模态分离前后仿真图进行了对比分析. 从表 4 中方案 a 可以看出, 五阶振动模态分别位于 10.22 Hz、12.42 Hz、12.71 Hz、12.83 Hz 和 12.93 Hz 处, 其一阶振动模态主要由第五排悬臂梁阵列的振动引起, 二阶振动模态主要由第

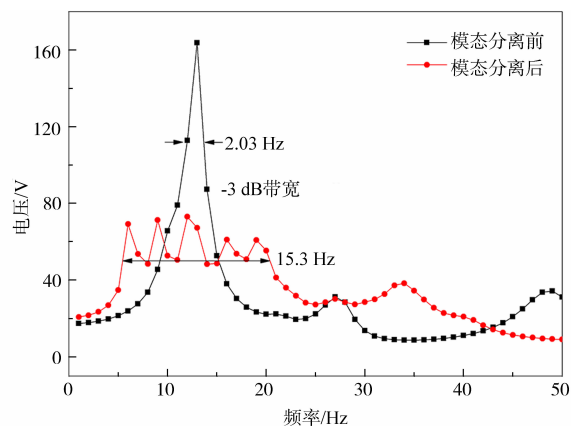


图4 3×5 模态分离后的阵列式发电机结构频率-电压输出响应

一排悬臂梁阵列的振动引起, 三阶振动模态主要由第二、第三和第四排悬臂梁阵列的振动引起, 四阶振动模态主要由第二和第四排悬臂梁阵列的振动引起, 五阶振动模态主要也是由第二、第三和第四排悬臂梁阵列的振动引起的, 可以发现其各排悬臂梁的阵列振动贡献给多个振动模态, 因此振动模态未分离. 经过对 3×5

阵列式发电机结构的参数调整(表4中的方案a7),五阶振动模态完全分离开,分别位于6.31Hz、9.16Hz、12.42Hz、16.18Hz和19.40Hz处.其中,一阶振动模态由第五排悬臂梁阵列的振动引起,二阶振动模态是由第一排悬臂梁阵列的振动引起,三阶振动模态由第二

排悬臂梁阵列的振动引起,四阶振动模态由第四排悬臂梁阵列的振动引起,五阶振动模态由第三排悬臂梁阵列的振动引起,可以发现其各排悬臂梁的阵列振动分别对应一个振动模态.

表4 不同方案下3×5阵列式能量采集器结构尺寸及共振模态(方案a1至a7)

方案	排数	悬臂梁尺寸(mm)			振动模态	共振频率(Hz)
		Cu	PZT	Fe		
a1	第五排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	一阶	10.22
	第一排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	二阶	12.42
	第二排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	三阶	12.71
	第四排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	四阶	12.83
	第三排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	五阶	12.93
a2	第五排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×5	一阶	8.99
	第一排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×5	二阶	11.28
	第二排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	三阶	12.71
	第四排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	四阶	12.83
	第三排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	五阶	12.93
a3	第五排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×5	一阶	8.99
	第一排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×5	二阶	11.27
	第二排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	三阶	12.82
	第四排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	四阶	12.82
	第三排	60×3×0.5	50×3×0.3	8×3×5	五阶	17.39
a4	第五排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×5	一阶	9.01
	第一排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×5	二阶	10.92
	第二排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×7	三阶	11.31
	第四排	60×8×0.5	50×8×0.3	8×8×5	四阶	12.83
	第三排	60×3×0.5	50×3×0.3	8×3×5	五阶	17.39
a5	第五排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×5	一阶	8.71
	第一排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×5	二阶	10.89
	第二排	60×6×0.5	50×6×0.3	8×6×7	三阶	12.99
	第四排	60×6×0.5	50×6×0.3	8×6×5	四阶	14.05
	第三排	60×3×0.5	50×3×0.3	8×3×5	五阶	17.70
a6	第五排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×12	一阶	6.31
	第一排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×9	二阶	9.16
	第二排	60×6×0.5	50×6×0.3	8×6×7	三阶	12.99
	第四排	60×6×0.5	50×6×0.3	8×6×5	四阶	14.05
	第三排	60×3×0.5	50×3×0.3	8×3×5	五阶	18.98
a7	第五排	60×16×0.5	50×16×0.3	16×8×12	一阶	6.31
	第一排	60×14×0.5	50×14×0.3	14×8×9	二阶	9.16
	第二排	60×6×0.5	50×6×0.3	6×8×8	三阶	12.42
	第四排	60×6×0.5	50×6×0.3	8×6×2.6	四阶	16.18
	第三排	60×3×0.5	50×3×0.3	3×8×3	五阶	19.40

为了使3×5阵列式发电机达到模态分离的效果,从方案a1调节到方案a7(表4).综合分析3×5阵列式发电机模态的变化过程,在一、二阶振动模态的减小和四、五阶振动模态的增大二者共同作用下,阵列式采集系统的频带得到拓宽.可以发现,当发电机的阵列数 n 增大,系统的共振频率个数增加(2个增加到5个),且共振频率范围增加(由10~12Hz增加到6~19Hz),带

宽进一步拓宽(由3.0Hz增加到6.8Hz,最终增加到15.3Hz),总的输出能量及电压也进一步增大(51.05V增加到73.05V).因此,随着系统的 n 增大,系统的各项性能均有所提高.

4 压电发电机加工与性能测试

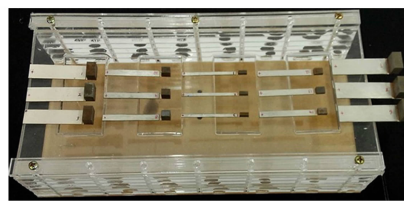
4.1 压电发电机结构加工

加工并测试3×5阵列式压电发电机模型,并与上述

的仿真结果进行对比,同时 3×5 阵列式采集器的实际尺寸和材料与仿真模拟中(方案 a7)设置的参数相同. 首先制作 PDMS 柔性框架,先将 PDMS 的主溶剂和硬化溶剂按质量比 10:1 混合倒入烧杯,用玻璃棒连续搅拌至混合物中气泡减少;放入常温干燥箱中进行抽真空,将混合物中的气泡完全排除;再将混合均匀后的 PDMS 溶液倒入制作好的磨具中,将干燥箱调节到 75°C 并固化 2 个小时,从磨具中揭下 PDMS 中空矩形框架. 柔性框架制备完成后,依次将十五个不同尺寸的单悬臂梁用胶水粘贴在 PDMS 上,并焊接电极(图 5(a)),最后将其安装在激振器上面连接到示波器上进行性能测试. 实验测试平台如图 5(b)所示,将阵列式发电机安装在激振器上. 信号发生器设置为正弦波输出方式,连接功率放大器将信号提供给激振器,激发压电发电机与激振器一起做简谐振动,此时加速度仪可监控发电机的实际振动频率和加速度,并通过示波器记录输出波形.

4.2 频率响应和电学性能测试

当系统加速度为 $1g$ ($g = 9.8\text{m/s}^2$) 时,图 6(a)为仿真和实验测试得到的阵列式发电机频率-电压响应曲



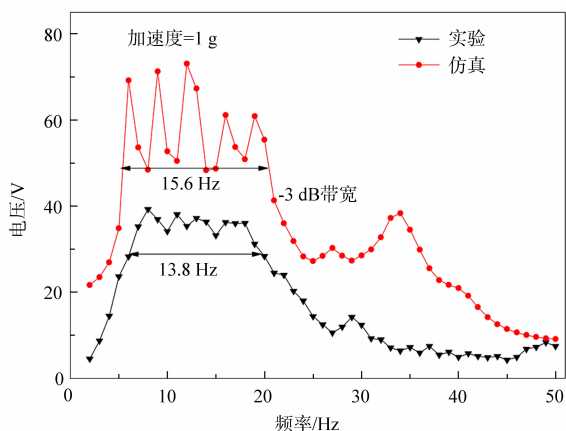
(a) 3×5 阵列采集器调整后的实物图



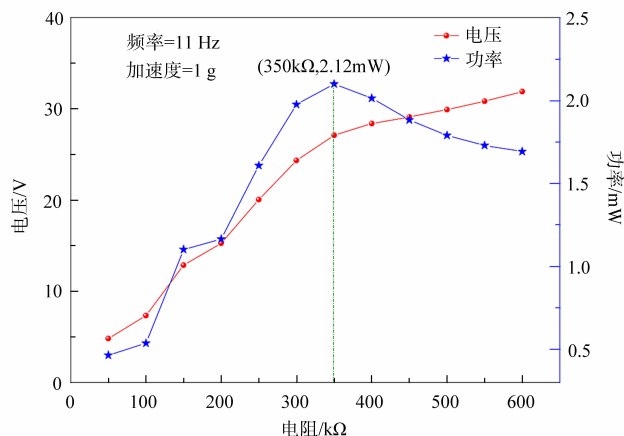
(b) 实验测试系统

图5 测试系统及采集器实物模型

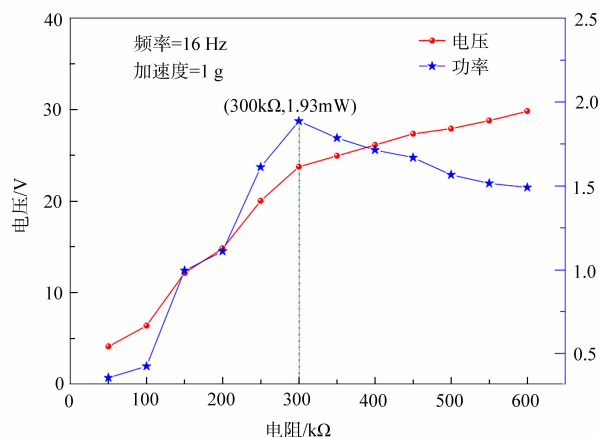
线,两条曲线在频率低于 50Hz 时均出现五个共振频率峰,且实验和仿真曲线的变化规律一致. 但实验与仿真产生大约 3Hz 的带宽误差,这可能由 PMMA 在实际振动环境中的干扰和测量损失所引起;相差约 30V 的输出电压可能由仿真过程中阻尼设置问题所引起.



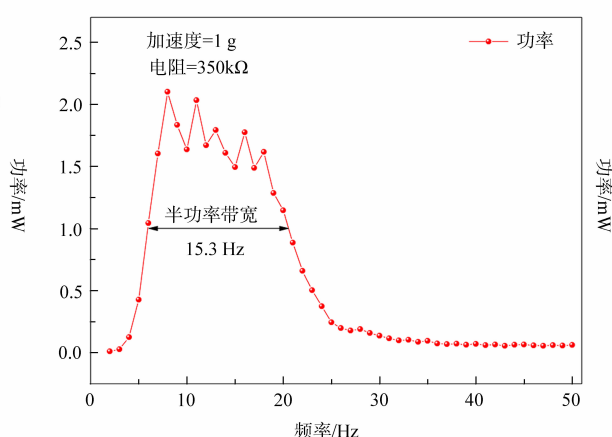
(a) 3×5 阵列式发电机实验与仿真输出响应曲线对比图



(b) 共振频率为 11Hz 时阵列式发电机随负载变化的输出电压-功率曲线



(c) 共振频率为 16Hz 时阵列式发电机随负载变化的输出电压-功率曲线



(d) 在负载为 $350\text{k}\Omega$ 时系统的功率随频率变化曲线图

图6 3×5 阵列发电机电学性能测试

根据功率计算公式,测量 3×5 阵列式发电机在不同负载和频率下的输出功率,如图 6(b) 和 6(c) 所示,本实验选择 5 个共振频率点中的 2 个(11Hz 和 16Hz)进行测试. 在图 6(b) 中,随着外接负载增加,输出电压先增加然后趋于稳定;输出功率随着电阻值的增大先增加后减小,且发电机在最优负载为 $350\text{k}\Omega$ 时的输出功率可达 2.12mW . 同时发现图 6(c) 中的曲线变化趋势与图 6(b) 相同,当共振频率为 16Hz,最优外接负载值为 $300\text{k}\Omega$ 时,系统可以获得的最大输出功率为 1.93mW . 如图 6(d) 所示,当系统加速度为 1g ,外界负载为 $350\text{k}\Omega$,频率在 6Hz 到 20.3Hz 范围内变化时,系统的半功率值为 1.05mW ,系统的半功率带宽可达 15.3Hz .

5 结论

基于模态分离技术设计了一种 3×2 , 3×3 和 3×5 阵列式压电能量采集结构,利用 COMSOL 仿真软件调整每一排压电悬臂梁的宽度和质量块的高度,所设计的 3×2 , 3×3 和 3×5 阵列式压电能量采集结构的振动模态分离明显,频率在低于 50Hz 的范围内系统频带宽度都得到拓宽. 同时对 3×5 阵列式压电能量采集结构进行实验测试,在 1g 加速度下系统频带宽度为 13.8Hz ;当共振频率为 11Hz 、最优负载电阻值为 $350\text{k}\Omega$ 时,系统的最大输出功率为 2.12mW . 整个 3×5 阵列式压电能量采集结构的半功率带宽达 15.3Hz . 这个优异的 U 输出性能使得其在多源、宽频振动环境中具有明显的优势.

参考文献

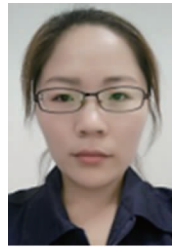
- [1] Raja S P, Rajkumar T D, Raj V P. Internet of things: challenges, issues and applications[J]. Journal of Circuits Systems and Computers, 2018, 27(12): 1830007.
- [2] Wu M, Ou Y, Mao H, et al. Multi-resonant wideband energy harvester based on a folded asymmetric M-shaped cantilever[J]. AIP Advances, 2015, 5(7): 077149.

- [3] 王光庆,刘创,张伟,等. 悬臂梁式压电双晶片振动发电的模型与实验研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(6): 819 - 824.
WANG Guangqing, LIU Chuang, ZHANG Wei, et al. Model and experimental researches of bimorph cantilevered vibration energy harvester[J]. Journal of Transduction Technology, 2015, 28(6): 819 - 824. (in Chinese)
- [4] Chen Z S, Guo B, Cheng C C, et al. Chaotic dynamics-based analysis of broadband piezoelectric vibration energy harvesting enhanced by using nonlinearity[J]. Shock and Vibration, 2016: 3584740.
- [5] Aridogan U, Basdogan I, Erturk A. Multiple patch - based broadband piezoelectric energy harvesting on plate-based structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(14): 1664 - 1680.
- [6] Halim M A, Park J Y. Piezoceramic based wideband energy harvester using impact-enhanced dynamic magnifier for low frequency vibration[J]. Ceramics International, 2015, 41(1): S702 - S707.
- [7] Rezaeisaray M, El Gowini M, Sameoto D, et al. Low frequency piezoelectric energy harvesting at multi vibration mode shapes[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2015, 228: 104 - 111.
- [8] Al-Ashtari W, Hunstig M, Hemsell T, et al. Frequency tuning of piezoelectric energy harvesters by magnetic force[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(3): 035019.
- [9] Andò B, Baglio S, Maiorcaf, et al. Analysis of two dimensional, wide-band, bistable vibration energy harvester[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 202: 176 - 182.
- [10] Chen R, Ren L, Xia H, et al. Energy harvesting performance of a dandelion-like multi-directional piezoelectric vibration energy harvester[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 230: 1 - 8.

作者简介



罗翠钱 女, 1990 年出生于陕西咸阳, 2018 年于太原理工大学获得博士学位, 现为山西财经大学信息学院老师, 主要从事微能源器件的研究.
E-mail: 20191008@sxufe.edu.cn



秦敏哲(通讯作者) 女, 1989 年出生, 阿米检测技术有限公司技术主管, 主要从事各种仪器的测试工作.
E-mail: am_qmz1989@163.com