

磁力增强涡激振动压电俘能器仿真及实验*

曹东兴^{1,2}, 丁相栋^{1,2}, 张伟^{1,2}, 姚明辉³

(1.北京工业大学材料与制造学部 北京, 100124)

(2.机械结构非线性振动与强度北京市重点实验室 北京, 100124)

(3.天津工业大学人工智能学院 天津, 300387)

摘要 为了提高低流速水流环境的俘能特性,基于涡激振动原理和压电振动能量采集技术,提出一种磁力增强涡激振动俘能器。该俘能器由压电层合悬臂梁、尾端圆柱绕流体和磁铁组成。首先,通过流-固-电耦合有限元仿真,分析了无附加磁力涡激振动压电俘能器的俘能特性,可知其低流速环境下俘能效率较低;其次,搭建流致振动俘能器实验平台,研究了磁力增强俘能器的俘能特性。实验结果表明:在横斥纵吸磁铁布置情况下,压电俘能器结构的固有频率较低,在较低流速下更容易起振,且达到涡激共振所需的流速范围较低;在磁场力的作用下其振动变形较大,输出电压较高,振动频带较宽;当水流流速为 0.5 m/s 时,磁力增强压电俘能器的输出功率均方根值达到 120 μW ,较无附磁情况的压电俘能器提高了 57.8%,这表明横斥纵吸磁式涡激振动压电俘能器在较低流速流场环境中具有更高的俘能效率。

关键词 振动能量采集;涡激振动;流固耦合;磁力增强
中图分类号 TH113.1; TN712.5

引言

随着无线传感器、便携式电子器件以及可穿戴等低功耗电子元器件的广泛应用,传统的基于化学电池的供电方式弊端显现。基于环境振动的能量采集技术作为一种绿色可持续发电技术近年来得到广泛关注^[1-3]。国内外学者提出了多种俘能器结构和分析方法来拓宽俘能器的工作频带,从而提高俘能效率。例如:多稳态俘能器^[4-7]、内共振俘能器^[8-10]和随机激励俘能器^[11-12]等。这些文献主要为针对基础激励的环境振动能量采集。

基于流致振动的压电能量采集技术得到了国内外学者的广泛关注^[13-16]。流致振动俘能器的研究在河流湖泊的水文监测设备、水下智能机器人的无源供电等领域具有重要的应用潜力。文献[17-18]提出一种复摆式涡激振动压电俘能器,基于流-固-电耦合原理,研究其在低速水流下的能量收集特性,发现压电俘能器在不同水流流速下存在不同的最优负载,在 0.35 m/s 的共振水流流速下,其最大输出功率为 84.49 μW 。Shan 等^[19]设计了一种采用偏心圆柱绕流体的压电俘能器,在低流速环境下可以发生弯-扭耦合振动,实验发现其俘能效果是传统实心圆柱

压电俘能器的 1.99 倍。Song 等^[20]提出了一种双圆柱绕流体阵列放置的压电俘能器,利用涡激振动和尾流诱发振动采集电能,并通过实验研究了其振动俘能特性。Shan 等^[21]提出一种采用柔性压电纤维材料作为压电振子的压电俘能器,利用上游的固定圆柱产生尾流涡脱,激励下游的柔性压电振子振动发电。Sun 等^[22]针对低流速流体设计了具有不同绕流体结构形式的流致振动俘能器,并进行了理论和实验研究。Wang 等^[23]提出 2 个正交相连的双梁多向流致振动俘能器并验证该结构具有良好的拓宽频带的优点。赵道利等^[24]研究了驰振作用下悬臂式压电能量采集器的振动和能量采集特性。

以上文献通过设计不同的绕流体结构,实现低流速环境的振动能量采集。根据基础激励环境振动俘能器研究结果可知,引入磁力可以有效调整结构的固有频率,扩宽结构的共振带宽,提高俘能器的发电效率。因此,笔者提出一种磁力增强型涡激振动压电俘能器结构。首先,利用有限元仿真软件对传统无附磁涡激振动压电俘能器进行流-固-电三场耦合有限元仿真,分析其振动俘能特性;其次,在此结构中引入磁力,通过实验研究不同的磁力布置方式

* 国家自然科学基金资助项目(11672008, 11972051)
收稿日期:2020-09-16;修回日期:2021-03-19

对俘能器俘能特性的影响,确定最优的磁力布置形式,并在系统中接入电阻,测试磁力增强涡激振动压电俘能器在低流速水流环境下的功率输出。

1 附磁式涡激振动压电俘能器的结构模型

图1为笔者设计的附磁式涡激振动压电俘能器 (piezoelectric vibration energy harvester, 简称PVEH)结构,主要由压电悬臂梁、圆柱绕流体和磁铁组成。附磁式涡激振动压电俘能器的整体结构放置在水下,并且沿着水流来流方向放置在流场中,压电悬臂梁由压电陶瓷材料(PZT-5H)铺设在金属基体层(磷青铜)上堆叠组成。圆柱绕流体的外部材料为聚丙交酯,在圆柱绕流体内部嵌入3块受激永磁铁(动磁铁),圆柱绕流体外部相对放置3块激励永磁铁(定磁铁)。该结构参数如表1所示。

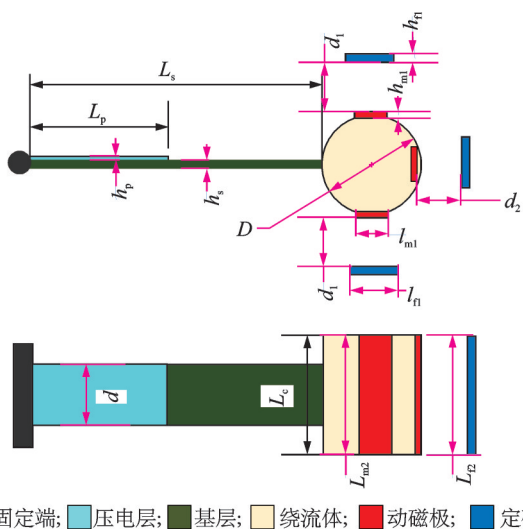


图1 附磁式涡激振动压电俘能器结构
Fig.1 Schematic and dimensions of the vortex-induced PVEH with magnets

2 涡激振动压电俘能器仿真分析

2.1 有限元仿真模型

图2为涡激振动压电俘能器的有限元仿真模型。其外部分布长方体流场,流场流质为水,流场模型包括流场入口、流场边界和流场出口,涡激振动压电俘能器顺着流体的流动方向放置在流场中。外部流场的长宽高分别为400,150和50 mm,流速取值范围为0.1~0.7 m/s。

基于实际模型情况,对有限元仿真模型做以下假设:①流场流态较平稳,其流体的仿真流动模型为

表1 附磁式涡激振动压电俘能器参数

Tab.1 System parameters of the vortex - induced piezoelectric vibration energy harvester

物理参数	符号及单位	数值
基础层长度	L_s/mm	80
基础层厚度	h_s/mm	0.2
悬臂梁宽度	d/mm	15
基础层弹性模量	E_s/GPa	106
基础层密度	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 500
压电陶瓷长度	L_p/mm	35
压电陶瓷厚度	H_p/mm	0.2
压电陶瓷密度	$\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 500
绕流体直径	D/mm	25
绕流体质量	m/g	33
绕流体高度	L_c/mm	30
受激永磁铁长度	l_{m1}/mm	30
受激永磁铁高度	L_{m2}/mm	12
受激永磁铁厚度	h_{m1}/mm	2.8
激励永磁铁长度	l_{n1}/mm	50
激励永磁铁高度	L_{n2}/mm	15
激励永磁铁厚度	h_{n1}/mm	2.8
横向磁场磁间距	d_1/mm	30
纵向磁场磁间距	d_2/mm	40

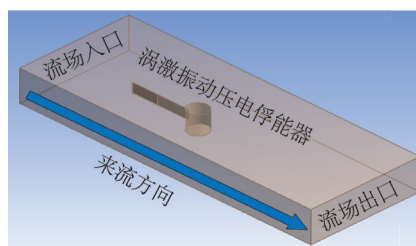


图2 涡激振动压电俘能器的有限元仿真模型
Fig.2 Finite element model of vortex-induced PVEH

层流;②压电层经高温烧结附着在基础层,其接触条件为粘连;③圆柱绕流体为刚体,不考虑其变形;④涡激振动压电俘能器的振动会改变周围流场涡激分布,有限元仿真模拟采用双向流固耦合。

2.2 涡激振动压电俘能器的动力学特性

涡激振动压电俘能器的法向位移波形如图3所示。该俘能器在流场涡激力作用下,随着仿真模拟计算时间的增加缓慢起振,然后趋于稳定。压电悬臂梁发生弯曲振动变形,利用法向位移来衡量结构的振动变形程度,从图中可以看出随着流场流速的增加,法向位移明显增加。

圆柱绕流体的位移变化更能直观表现俘能器发生的弯曲振动变形。为了进一步描述涡激振动压电

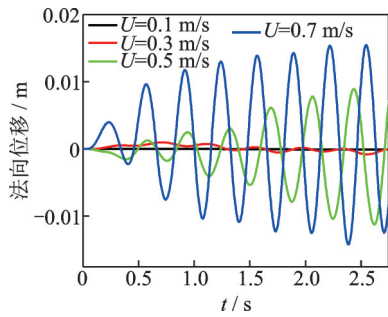


图3 涡激振动压电俘能器的法向位移波形图

Fig.3 Normal displacement waveform of vortex-induced PVEH

俘能器的弯曲变形,涡激振动压电俘能器变形云图如图4所示,流速 U 分别为0.1,0.3,0.5和0.7 m/s时的最大位移分别为0.064,0.41,2.76和4.53 mm。可见,压电俘能器的位移随着流速的增加而明显增加。

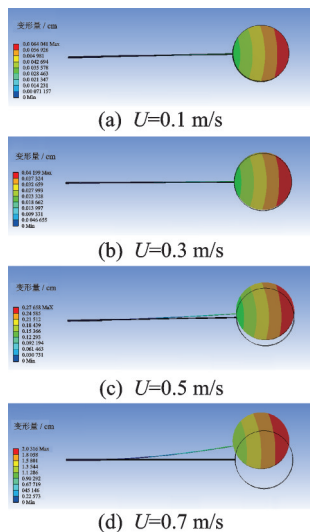


图4 涡激振动压电俘能器变形云图

Fig.4 Total deformation cloud of vortex-induced PVEH

2.3 涡激振动压电俘能器俘能特性分析

在流固耦合计算模型中添加压电模块,电极方向垂直于压电悬臂梁表面。不同流速下压电俘能器的压电层电场强度如图5所示。图中箭头表示电场矢量,红色表示电场强度最大,这意味着靠近固定端的压电材料变形最大。可以看出,随着流速的增大,压电材料的电场强度逐渐增大。

不同流速下压电俘能器的振动和俘能特性如图6所示。图6(a),(b)描述了不同流速下涡激振动压电俘能器的输出电压随时间演变的波形图和快速傅里叶变化图。可以看出,随着水流流速 U 的增加,俘能器输出电压和振动频率逐渐增加,同时也间接证明了涡脱频率随着水流流速的增加而逐渐增加。为了进一步描述

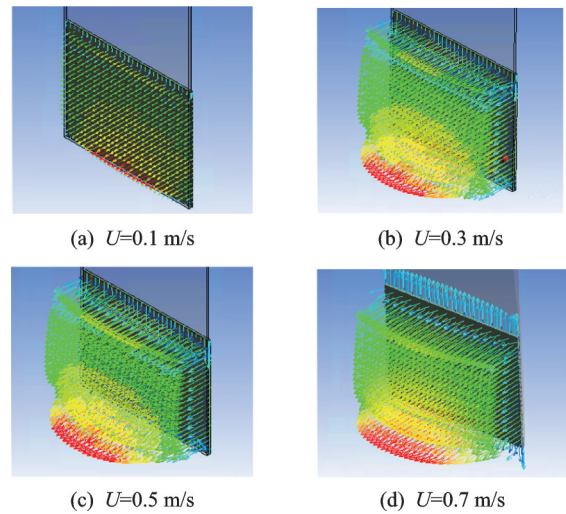


图5 不同流速下压电俘能器的压电层电场强度

Fig.5 Piezoelectric layer electric field intensity of vortex-induced PVEH at different flow velocities

水流流速对压电俘能器发电效果的影响,图6(c)描述了输出电压与流速的关系。在流速较低时俘能器的发电效果不理想,随着流速的增加,俘能效果的改善非常明显。这也说明压电俘能器的发电效果依赖于较高流速,在低流速时压电俘能器不容易起振。

3 磁力增强涡激振动压电俘能器实验

3.1 实验平台搭建

对涡激振动压电俘能器的有限元仿真分析发现,较低流速时涡激脱落频率较低,涡脱激励强度较弱,压电俘能器不易起振,涡激共振的发生需要达到较高的流速范围,较低流速范围内压电俘能器的振动幅度较弱,其发电效果不理想。为了提高压电俘能器在较低流速范围内的发电效果,笔者对压电俘能器的圆柱绕流体附加外磁场,外磁场为绕流体提供来自横向和纵向2个方向的磁力,构成附磁式涡激振动压电俘能器。实验研究了4种不同磁场布置方式下压电俘能器的振动俘能特性及其发电效果,探究最优的磁场布置方式。

实验平台示意图如图7所示。实验平台主体为一个水循环系统,包括供水系统和实验水槽系统。供水系统主体包括储水桶、水泵和水管。实验水槽系统包括流场稳流装置(包括阻尼网和蜂窝器)、实验水槽和泄水阀门。水泵将储水装置中的水经过进水管运输到实验水槽中,水流流经流场稳流装置后流过实验水槽段,经泄水阀门流回到储水装置中。通过进水管、回水管和泄水阀门可以精确控制调节流速,并通过流速计实时监测流场流速。附磁式涡激振动压电俘能器通过夹具固定放置在实验水槽

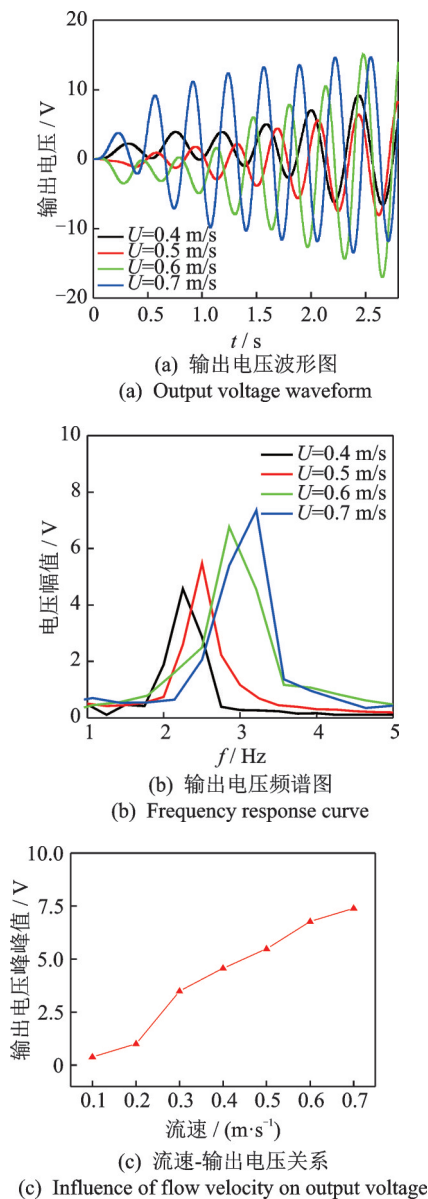


图 6 不同流速下压电俘能器的振动和俘能特性

Fig.6 Analysis of vibration and energy harvest characteristics of vortex-induced PVEH at different flow velocities

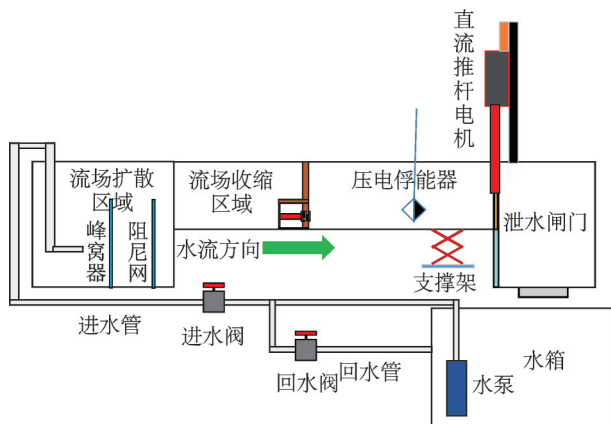


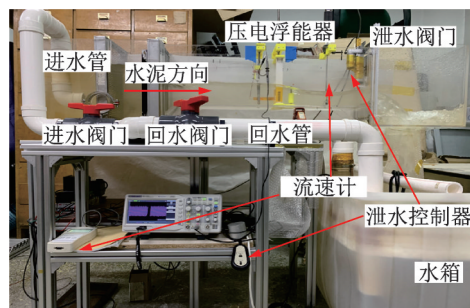
图 7 实验平台示意图

Fig.7 Schematic diagram of the experimental platform

中,保证压电俘能器在实验过程中完全浸入水中,最后通过示波器观察实验波形,采集实验数据。

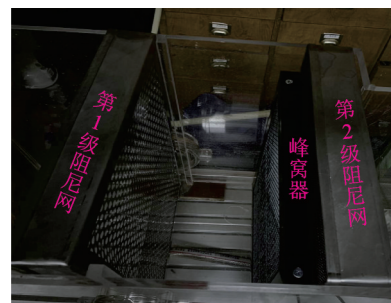
图 8 为压电俘能器实验平台和流场稳流装置实体图。实验水槽段的水槽长度为 0.8 m,高度为 200 mm,宽度为 150 mm,水槽壁的材料为透明有机玻璃材料。为了满足实验平台在较高流速时流场能保持稳定,在实验平台的流场扩散区域增设了流场稳流装置,主要包括第 1 级阻尼网,蜂窝器和第 2 级阻尼网。其中,第 1 级阻尼网的网口直径大于第 2 级阻尼网的网口直径。其目的是破坏水流原有的漩涡,使水流的湍流度经过层层衰减,保证实验水槽段的流场稳定性,使流场接近于层流状态。

图 9 为俘能器模型实物样机。将圆柱绕流体的



(a) 压电俘能器实验平台

(a) Physical diagram of experimental platform



(b) 流场稳流装置图

(b) Flow-stabilizing device

图 8 压电俘能器实验平台和流场稳流装置实体图

Fig.8 Physical diagram of experimental platform and flow-stabilizing device

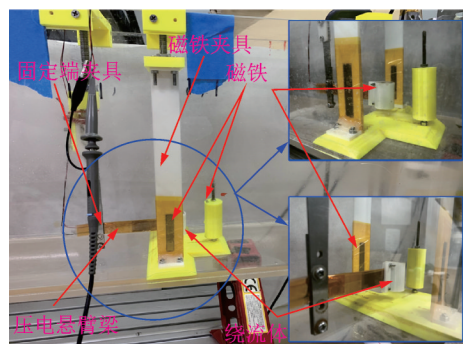


图 9 俘能器模型实物样机

Fig.9 Prototype of the vortex-induced PVEH

后侧磁场视为横向磁场,将左右侧磁场的磁间距视为纵向磁场。为了减小压电俘能器的固定夹具对流场的影响,将压电俘能器的固定夹具设计成薄壁框架的形式。为了保证压电俘能器的绝缘特性,需要对压电悬臂梁做防水处理。

3.2 磁极布置方式实验优化分析

附磁式涡激振动压电俘能器在振动过程中,根据绕流体所受的横向和纵向磁场力,可分为4种磁极布置方式:横向相斥磁场和纵向相吸磁场(横斥纵吸)、横向相吸磁场和纵向相吸磁场(横吸纵吸)、横向相斥磁场和纵向相斥磁场(横斥纵斥)、横向相吸磁场和纵向相斥磁场(横吸纵斥)。

流速为0.55 m/s时,不同磁极布置方式下的附磁式涡激振动压电俘能器的振动俘能特性如图10所示。压电俘能器的输出电压从高到低排序为:横斥纵吸>横吸纵吸>无附磁>横斥纵斥>横吸纵斥。振动频率从低到高排序为:横斥纵吸<横吸纵吸<横斥纵斥<无附磁<横吸纵斥。

由图10(b)可知:在水流流速均为0.55 m/s时,横斥纵吸附磁式压电俘能器的输出电压幅值为25.5 V,无附磁压电俘能器的输出电压幅值为17.2 V,前者较后者的输出电压幅值提升了48.2%;

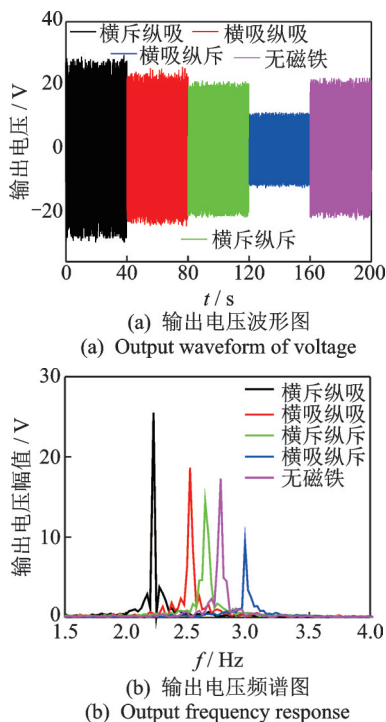


图10 流速为0.55 m/s时不同磁极布置方式下附磁式涡激振动压电俘能器的振动俘能特性

Fig.10 Analysis of vibration and energy harvest characteristics of vortex-induced PVEH with different magnets when flow velocity $U=0.55$ m/s

横斥纵吸附磁式压电俘能器的振动频率为2.225 Hz,无附磁压电俘能器的振动频率为2.775 Hz,前者较后者的振动频率降低了19.9%。分析可知,相较于无附磁结构,横斥纵吸附磁式压电俘能器在磁场力和涡激力的作用下,具有更低的振动频率和更高的电压输出。由于不同附磁方式的压电俘能器的共振频率不同,共振时所需水流流速不同,因此具有较低振动频率的结构在较低流速下更容易发生涡激共振。

图11为不同磁极布置方式下附磁式涡激振动压电俘能器在不同流速时的振动俘能特性。由图11(a)所示,不同附磁方式的压电俘能器的振动频率变化规律存在一个共同特征:随着流速的增加,压电俘能器的振动频率逐渐增加。在相同流速下,横斥纵吸附磁式压电俘能器的振动频率整体上低于其他4种情况。可见,横斥纵吸的磁场力可以有效降低压电俘能器的固有频率。由于压电俘能器的固有频率越低,其发生涡激共振所需要的涡脱频率越低,即发生涡激共振所需要的水流速度越低,故横斥纵吸附磁式压电俘能器结构产生涡激共振所需的水流速度最低。

将采集到的输出电压带入均方根值公式,得到图11(b),横斥纵吸附磁式压电俘能器在流速低于0.3 m/s时更容易起振,表现为其输出电压均方根值

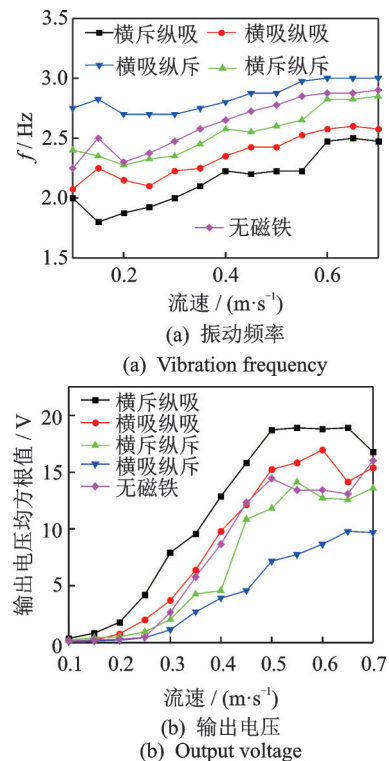


图11 不同磁极布置方式下附磁式涡激振动压电俘能器在不同流速时的振动俘能特性

Fig.11 Analysis of vibration and energy harvest characteristics of vortex-induced PVEH with different magnets at different flow velocities

明显高于其他4种情况。随着流速的增加,横斥纵吸附磁式压电俘能器的输出电压均方根值也明显高于其他4种情况,这说明压电俘能器在横向的磁吸引力和纵向的磁排斥力的作用下,其振动变形会明显增大。在流速均为0.5 m/s时,横斥纵吸附磁式和无附磁压电俘能器的输出电压均方根值分别为18.7 V和14.4 V,前者较后者提升了29.8%。

综上所述:横斥纵吸附磁式压电俘能器结构的固有频率较低,其起振所需的起振流速较低,共振所需的共振流速较低;在横向磁吸引力和纵向磁排斥力的作用下,其振动变形较大;根据图11(b)可以看出,横斥纵斥的磁场力可以拓宽频带,故其涡激振动的锁定区域较宽。

3.3 最优磁力增强涡激振动压电俘能器实验结果

选择在低流速下振动俘能特性最优的压电俘能器结构,即横斥纵吸附磁式涡激振动压电俘能器,接入外接电阻,研究其输出功率特性。图12为附磁式和无磁式涡激振动压电俘能器的发电效果对比。可见,随着外接电阻的增大,压电俘能器的输出电压随之增大,然后趋于稳定。压电俘能器的输出功率随着外接电阻的增大,先增大后减小。存在一个最优的电阻阻值 $R=0.51\text{ M}\Omega$,使压电俘能器的输出功

率达到最大值,最大功率为 $120\text{ }\mu\text{W}$ 。

同时,图12也对比了附磁式和无磁式涡激振动压电俘能器的发电效果。结果发现,横斥纵吸附磁式涡激振动压电俘能器的输出电压均方根值和输出功率均方根值较无附磁的涡激振动压电俘能器均有明显提高,在外接电阻均为 $0.51\text{ M}\Omega$ 时,二者的输出功率都达到最大值,前者为 $120\text{ }\mu\text{W}$,后者为 $76\text{ }\mu\text{W}$,前者较后者提升了57.8%。

4 结 论

1) 所设计的涡激振动压电俘能器的振动频率随着水流流速增加而增大,水流流速对压电俘能器的俘能特性存在决定性影响,发电效率依赖于较高的流速。

2) 不同附磁形式的涡激振动压电俘能器的振动俘能特性存在较大区别。其中,横斥纵吸附磁式压电俘能器结构的固有频率较低,在较低流速下更容易起振,达到涡激共振所需的流速范围较低。

3) 在附加横斥纵吸磁场力的作用下,压电俘能器振动变形较大,输出电压较高,压电俘能器的振动频带较宽,即涡激振动的锁定区域较宽。

4) 在相同水流流速下,横斥纵吸附磁式涡激振动压电俘能器的输出电压均方根值达到 $120\text{ }\mu\text{W}$,较无附磁压电俘能器提高了57.8%。

参 考 文 献

- [1] ZOU H X, ZHAO L C, GAO Q H, et al. Mechanical modulations for enhancing energy harvesting: principles, methods and applications [J]. Applied Energy, 2019, 255: 113871.
- [2] 徐振龙, 单小彪, 谢涛. 宽频压电振动俘能器的研究现状综述[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 190-199.
XU Zhenlong, SHAN Xiaobiao, XIE Tao. A review of broadband piezoelectric vibration energy harvester [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 190-199. (in Chinese)
- [3] 魏克湘, 邹鸿翔, 张文明. 基于滚压的悬架振动俘能装置设计与特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 897-901.
WEI Kexiang, ZOU Hongxiang, ZHANG Wenming. Design and analysis of vibration energy harvester for self-powered vehicle suspension based on rolling-press [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 897-901. (in Chinese)
- [4] SUN S, CAO S Q. Analysis of chaos behaviors of a bistable piezoelectric cantilever power generation system by the second-order Melnikov function [J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 33(1): 200-207.
- [5] ZHOU S, ZUO L. Nonlinear dynamic analysis of

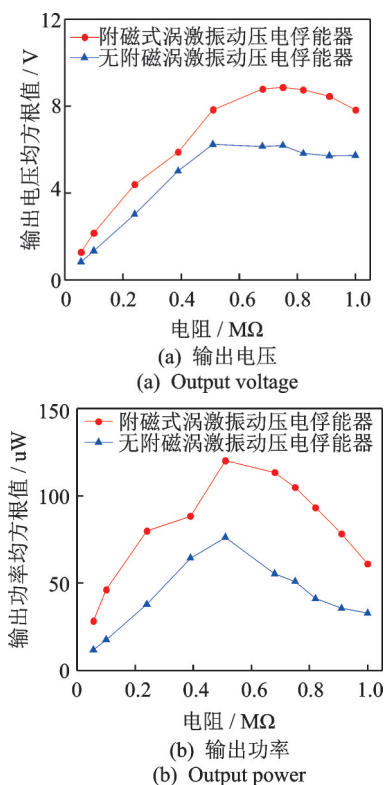


图12 附磁式和无磁式涡激振动压电俘能器发电效果对比
Fig.12 Comparison of power generation effect of vortex-induced PVEH with magnets and without magnets

- asymmetric tristable energy harvesters for enhanced energy harvesting [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2018, 61: 271-284.
- [6] ZHAO L C, ZOU H X, YAN G, et al. Arbitrary-directional broadband vibration energy harvesting using magnetically coupled flextensional transducers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(9): 095010.
- [7] 赵泽翔, 王光庆, 王学保, 等. 三稳态压电能量采集器的动态特性与实验[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(4): 668-672.
ZHAO Zexiang, WANG Guangqing, WANG Xuebao, et al. Dynamic characteristics and experimental analysis of tri-stable piezoelectric energy harvester [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(4): 668-672. (in Chinese)
- [8] CAO D X, LEADENHAM S, ERTURK A. Internal resonance for nonlinear vibration energy harvesting [J]. *European Physical Journal-Special Topics*, 2015, 224(14/15): 2867-2880.
- [9] LU Z Q, DING H, CHEN L Q. Resonance response interaction without internal resonance in vibratory energy harvesting [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 121: 767-776.
- [10] CHEN L Q, JIANG W A. Internal resonance energy harvesting [J]. *Journal of Applied Mechanics - Transactions of the Asme*, 2015, 82(3): 031004.
- [11] LIU D, XU Y, LI J L. Probabilistic response analysis of nonlinear vibration energy harvesting system driven by Gaussian colored noise [J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2017, 104: 806-812.
- [12] ZHAO S, ERTURK A. Deterministic and band-limited stochastic energy harvesting from uniaxial excitation of a multilayer piezoelectric stack [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 214: 58-65.
- [13] WANG J, GENG L, DING L, et al. The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations [J]. *Applied Energy*, 2020, 267: 114902.
- [14] 宋汝君, 单小彪, 杨先海, 等. 基于压电俘能器的流体能量俘获技术研究现状[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(17): 244-250.
SONG Rujun, SHAN Xiaobiao, YANG Xianhai, et al. A review of fluid energy capture technology based on piezoelectric energy harvesters [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(17): 244-250. (in Chinese)
- [15] 曹东兴, 马鸿博, 张伟. 附磁压电悬臂梁流致振动俘能特性分析 [J]. *力学学报*, 2019, 51(4): 1148-1155.
CAO Dongxing, MA Hongbo, ZHANG Wei. Energy harvesting analysis of a piezoelectric cantilever beam with magnets for flow-induced vibration [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1148-1155. (in Chinese)
- [16] 阚君武, 富佳伟, 王淑云, 等. 涡激振动式微型流体俘能器的研究现状与展望[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1502-1512.
- KAN Junwu, FU Jiawei, WANG Shuyun, et al. Research status and prospect of vortex-induced vibration micro-fluid energy harvester [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1502-1512. (in Chinese)
- [17] SONG R J, SHAN X B, LV F, et al. A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension [J]. *Ceramics International*, 2015, 41: S768-S773.
- [18] 宋汝君, 单小彪, 范梦龙, 等. 涡激振动型水力复摆式压电俘能器的仿真与实验研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(19): 78-83.
SONG Rujun, SHAN Xiaobiao, FAN Menglong, et al. Simulations and experiments on a hydrodynamic compound pendulum piezoelectric energy harvester accompanied with vortex-induced vibration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(19): 78-83. (in Chinese)
- [19] SHAN X, JIE D, SONG R J, et al. A piezoelectric energy harvester with bending-torsion vibration in low-speed water [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(2): 116.
- [20] SONG R, SHAN X, LV F, et al. A novel piezoelectric energy harvester using the macro fiber composite cantilever with a bicylinder in water [J]. *Applied Sciences*, 2015, 5(4): 1942-1954.
- [21] SHAN X, SONG R, LIU B, et al. Novel energy harvesting: a macro fiber composite piezoelectric energy harvester in the water vortex [J]. *Ceramics International*, 2015, 41: S763-S767.
- [22] SUN W, ZHAO D, TAN T, et al. Low velocity water flow energy harvesting using vortex induced vibration and galloping [J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113392.
- [23] WANG J, HU G, SU Z, et al. A cross-coupled dual-beam for multi-directional energy harvesting from vortex induced vibrations [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(12): 12LT02.
- [24] 赵道利, 胡新宇, 孙维鹏, 等. 基于驰振的压电能量采集器建模与实验研究 [J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(3): 437-442.
ZHAO Daoli, HU Xinyu, SUN Weipeng, et al. Modeling and experimental study of galloping-based piezoelectric energy harvester [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(3): 437-442. (in Chinese)



第一作者简介:曹东兴,男,1978年9月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为振动能量采集和减振隔振等。曾发表《Design and performance enhancement of a force-amplified piezoelectric stack energy harvester under pressure fluctuations in hydraulic pipeline systems》(《Sensors and Actuators A: Physical》2020, Vol.309)等论文。
E-mail: caostar@bjut.edu.cn