

DOI: 10.3901/JME.2022.20.101

# 潜水式尾流激振压电俘能器的输出性能研究\*

单小彪 隋广东 田海港 王艺聪 谢 涛

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为解决水下传感器的自供能问题,提出一种潜水式尾流激振压电俘能器。通过推导的俘能器流-固-电耦合场数学模型,结合有限元仿真模型,获得俘能器的流激力。仿真与试验数据具有良好的一致性,验证数学模型和仿真的正确性。对于振动柱直径为 15 mm 的俘能器,增加固定柱直径可有效提高其输出性能。当两柱中心距为 20 mm 时,PEH\_05\_15 俘能器输出最大电压为 23.36 V,是 PEH\_00\_15 俘能器最大输出电压的 1.51 倍。PEH\_05\_20 俘能器在中心距为 15 mm 时输出最大电压为 41.85 V,同比无固定柱俘能器的输出电压提升了 1.21 倍。

**关键词:** 压电俘能器; 尾流激振; 流-固-电耦合; 输出电压; 俘获性能

**中图分类号:** TN384; TM619

## Output Characteristics Investigation of Submersible Wake-excited Piezoelectric Energy Harvester

SHAN Xiaobiao SUI Guangdong TIAN Haigang WANG Yicong XIE Tao

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** To solve the problem of self-supply of underwater sensors, a submersible wake-excited piezoelectric energy harvester (PEH) is proposed. Through the deduced mathematical model of the fluid-solid-electric coupling field of the PEH, combined with the finite element simulation model, the flow excitation force of the PEH is obtained. The simulation and experimental data are in good agreement, which verifies the correctness of the mathematical model and simulation. When the diameter of the vibrating column is 15 mm, increasing the diameter of the fixed column can effectively improve the output performance. When the distance between the two columns is 20 mm, the maximum output voltage of the PEH\_05\_15 is 23.36 V, which is 1.51 times the maximum output voltage of PEH\_00\_15. When the distance between the two columns is 15 mm, the maximum output voltage of PEH\_05\_20 is 41.85 V, which is 1.21 times higher than that of PEH\_00\_20.

**Key words:** piezoelectric energy harvester; wake-excitation; fluid-solid-electric coupling; output voltage; harvesting performance

## 0 前言

随着 5G 技术和物联网的快速发展和广泛应用,对其低功耗传感器网的持续供能问题一直以来都是学者的重点研究方向<sup>[1-3]</sup>。目前大多数传感器依然采用电池作为主要供能源,但是电池具有使用寿命有限、更换困难、污染环境等缺点而在很多场合受到使用制约。因此,亟需寻找一种具有持续性、经济性、环保性的供能方式,其中利用振动能量转变成

电能的方式被认为是一种有效的替代方案。到目前为止,已经开发了很多种利用振动的俘能技术,例如压电式<sup>[4-6]</sup>、电磁式<sup>[7-9]</sup>和摩擦发电式<sup>[10-12]</sup>。其中,压电俘能器因其结构简单、功率密度高、能量转换效率高以及易于制造等优点而备受关注。

为了使压电俘能器具有更好的实用性,许多学者利用具有广泛分布,可持续采集的流体能作为主要振动能源。流致振动主要包括涡激振动<sup>[13-14]</sup>、尾流激振<sup>[15-16]</sup>、颤振<sup>[17-18]</sup>和驰振<sup>[19-20]</sup>等形式,其中涡激振动和尾流激振方式可使俘能器具有较低的起振流速,适用于低流速环境中。在风场中,QIN 等<sup>[21]</sup>提出了一种集涡激振动、驰振和多稳态于一体的风

\* 国家自然科学基金资助项目(51677043, 51875116)。20211105 收到初稿,20220630 收到修改稿

能俘能器,可在较宽风速范围内保持有效输出。WANG 等<sup>[22]</sup>基于涡激振动俘能器的研究基础上,将圆柱表面配置多种分流器,并研究了分流器的安装角度和尺寸参数对俘能器输出性能的影响。KAN 等<sup>[23]</sup>为了提高可靠性,环境适应性和发电性能,研究了一种增强型风致压电俘能器,该俘能器通过下游引入菱形挡板而改变涡激振动和驰振的流场,从而实现涡激振动和驰振的耦合。试验表明结构参数对俘能器的振动特性、发电性能和风速带宽具有显著影响。USMAN 等<sup>[24]</sup>提出了一种利用尾流激振形式的俘能器,研究确定了流速和下游圆柱体的相对位置对系统输出电压的影响。TALEBITOOTI 等<sup>[25]</sup>研究了一种基于尾流激振的宽频阵列式俘能器,其最大输出性能得到了显著提高。

上述研究侧重于从相对高速范围的风场中收集能量。与作用在风场中的俘能器相比,研究在液体环境中工作的俘能器数量相对较少,主要原因是因为封装,引线和测试操作等问题需要解决。此外,自然和工业环境中液体流速通常较低,且伴随出现流速波动。因此,共振型压电俘能器在应用于液体环境中面临着许多挑战。宋汝君等<sup>[26]</sup>研究了基于涡激振动水下俘能器,并得到了水速与外接电阻对俘能器的输出特性影响规律。LIU 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于尾流激振的 E 型俘能器。试验结果表明,该构型可适应更宽的流速范围并具有更高的输出性能。CHANG 等<sup>[28]</sup>模仿鳗鱼运动状态研究了一种尾流激振式俘能器,并对尾流的钝体尺寸、板尺寸和输出性能之间建立了相关性。SHAN 等<sup>[29-30]</sup>研究了沿水流方向串联布置两个俘能器,发现这种串联式俘能器具有更高的能量收集效率和更宽可用流速范围等优点。ZHAO 等<sup>[31]</sup>比较了不同形状振子的涡激振动和尾流激振形式的俘能器输出特性,研究结果证明了尾流激振式俘能器的输出性能明显优于涡激振动和无尾流干扰的驰振式压电俘能器。

虽然国内外学者已经有研究尾流激振式压电俘能器,但现有文献大多是将俘能器的振子部分侵入水中,压电片接线位置裸露在空气中,这种构型虽然可解决封装防水的问题,但同时也由于受到了夹具的制约,因此不适用于较宽河道中。另外所设计的俘能器振子的摆放形式也受到了限制,即只能设计振子向下式。

因此,为了更高效俘获水流致振动能量,在提出的尾流激振压电俘能器的基础上,进一步研究潜水式俘能器的结构参数对其输出性能的影响。通过推导的俘能器流-固-电耦合场数学模型,结合 CFD

有限元仿真技术,获得振动柱所受流激力。搭建水洞试验平台,制作俘能器样机,验证理论仿真模拟的正确性。研究分析结构尺寸和中心距对俘能器输出性能的影响。

## 1 压电俘能器的结构设计

潜水式尾流激振压电俘能器的结构模型如图 1 所示。该压电俘能器包括固定柱,振动柱、基体(铜片)、压电片、夹具和固定底座。其中,压电片粘贴在基体表面,一端由夹具固定,另一端与振动柱中心位置连接形成压电悬臂梁结构。固定柱与振动柱沿水流方向串联排列,当水流经过固定柱时,会在其后方形成周期性交替变化的压力涡旋。该压力涡旋不仅使后方的振动柱受到自身由于水流产生的涡激力作用,而且也受到由固定柱产生的尾流激力影响。由涡激力和尾流激力耦合作用产生的周期力使压电悬臂梁产生弯曲变形,由于正压电效应,使其压电片输出电能。潜水式尾流激振压电俘能器的结构参数如表 1 所示。

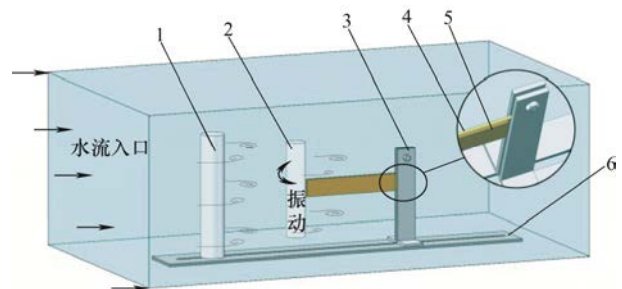


图 1 潜水式尾流激振压电俘能器结构模型图

1. 固定柱 2. 振动柱 3. 夹具 4. 基体(铜片)  
5. 压电片(MFC) 6. 固定底座

表 1 潜水式尾流激振压电俘能器尺寸参数

参数	数值
基体密度 $\rho_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	8 900
基体厚度 $h_s/\text{mm}$	0.15
基体弹性模量 $E_s/\text{GPa}$	108
压电片密度 $\rho_p/(\text{kg}/\text{m}^3)$	5 440
压电片厚度 $h_p/\text{mm}$	0.3
压电片弹性模量 $E_p/\text{GPa}$	15.857
悬臂梁宽度 $d_b/\text{mm}$	17
悬臂梁质量 $m_b/\text{kg}$	0.006
悬臂梁有效长度 $l_b/\text{mm}$	85
固定柱直径 $D/\text{mm}$	5/10/15/20/25
固定柱长度 $l_d/\text{mm}$	120
振动柱直径 $d/\text{mm}$	15/20
振动柱长度 $l_d/\text{mm}$	100
振动柱、固定柱密度 $\rho_v/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 200

## 2 压电俘能器建模

### 2.1 数学模型

根据振动力学和压电学，将压电悬臂梁简化为单自由度质量-弹簧-阻尼系统，其等效物理模型如图 2 所示。

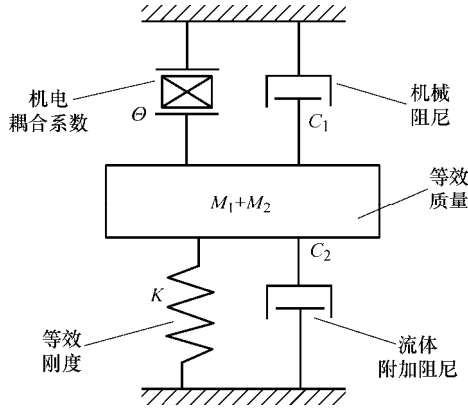


图 2 单自由度俘能系统等效物理模型

由于水的粘滞系数和密度比较大，所以当振动柱由尾流激力和涡激力耦合作用振动时，会产生流体附加质量和流体附加阻尼。根据俘能器实际工作情况，现对其作以下假设：① 忽略粘贴基体和压电片的环氧树脂胶的厚度和刚度；② 压电悬臂梁仅有弯曲变形，忽略扭转变形；③ 尾流激力和涡激力作用点在振动柱的几何中心处。该单自由度压电俘能器的流固电耦合方程可写为

$$\begin{cases} M\ddot{w}(x,t) + C\dot{w}(x,t) + Kw(x,t) + \Theta V(t) = F(t) \\ \frac{V(t)}{R_L} + C_p \dot{V}(t) - \Theta \dot{w}(x,t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， $M$  是俘能器等效质量，包括俘能器的等效质量  $M_1$  和流体附加质量  $M_2$ ， $w(x,t)$  为振动柱的几何中心点在  $t$  时刻的横向位移， $C$  是俘能器等效阻尼，包括机械阻尼  $C_1$  和流体附加阻尼  $C_2$ ， $K$  压电悬臂梁等效刚度， $\Theta$  是机电耦合系数， $V(t)$  是开路输出电压， $F(t)$  是等效流激力， $C_p$  是压电片电容，本文所用压电片的电容为 84.04 nF， $R_L$  是外接电阻。其中流体附加质量  $M_2$  包括振动柱在水流场中的附加质量  $m_a$  和悬臂梁部分的附加质量  $m_b$ ，流体附加阻尼包括振动柱在流场中的附加阻尼  $C_a$  和悬臂梁部分的附加阻尼  $C_b$ 。根据文献[32]可写为

$$m_a = \frac{C_M \rho_l \pi d^2 l_a}{4} \quad (2)$$

$$m_b \approx \frac{1.055 3 \rho_l \pi d_b^2 l_b}{4} \quad (3)$$

$$C_a = \frac{C_D \omega \rho_l d^2 l_a}{4 \pi St} \quad (4)$$

$$C_b = \rho_l \frac{\pi}{4} d_b^2 \omega l_a \left( \frac{b_1}{\sqrt{Re}} + \frac{b_2}{Re} \right) \quad (5)$$

式中， $C_M$  为附加质量系数，截面为圆形时  $C_M = 1$ ， $\rho_l$  为流体密度， $C_D$  为流体附加阻尼系数， $C_D = 2$ ， $\omega$  为压电悬臂梁的振动频率， $St$  为斯特劳哈尔数， $St \approx 0.21$ ，参数  $b_1$  和  $b_2$  分别为 3.81 和 2.74， $Re$  为雷诺数。

为了求解流-固-电耦合方程，将式(2)~(5)代入式(1)，引入状态空间向量  $\mathbf{X} = (w(x,t), \dot{w}(x,t), V(t))^T$ ，将状态空间向量对时间  $t$  求导可得

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \dot{w}(x,t) \\ \ddot{w}(x,t) \\ \dot{V}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{C}{M} & -\frac{\Theta}{M} \\ 0 & \frac{\Theta}{C_p} & -\frac{1}{R_L C_p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{1}{M} F \quad (6)$$

由于本文需要对不同振动柱直径的压电俘能器进行输出性能对比，故表 2 所示两种压电俘能器的结构参数。

表 2 不同振动柱直径的压电俘能器结构参数

参数	$d = 15 \text{ mm}$	$d = 20 \text{ mm}$
等效刚度 $K/(\text{N/m})$	29.48	27.23
俘能器的等效质量 $M_1/\text{kg}$	0.0371	0.0478
俘能器机械阻尼 $C_1/[\text{N}/(\text{m/s})]$	0.103	0.0831
机电耦合系数 $\Theta$	$1.717 \times 10^{-4}$	$1.778 \times 10^{-4}$

### 2.2 有限元模型

潜水式尾流激振压电俘能器涉及流-固-电多物理场耦合问题，上文已经对压电俘能器的各项参数列举了求解方法和结果。但对于振动柱的等效流激力需要采用 CFD 方法，将不同流场情况下的振动柱所受流激力结果代回耦合方程式(1)，并分别分析固定柱直径  $D$ 、振动柱直径  $d$ 、两柱中心距离  $L$  和流速  $v$  等变量对该俘能器输出特性的影响规律。图 3 表示建立的压电俘能器有限元模型，仿真计算区域为矩形，尺寸  $10D \times (12D + L)$ 。根据上文耦合方程编写 UDF(用户自定义函数)文件导入 CFD 仿真软件中，加载在振动柱的刚性边界网格上，边界网格跟随振动柱一同运动，保证了周围的网格质量。振动柱所受流激力可以在仿真中实时计算求得。

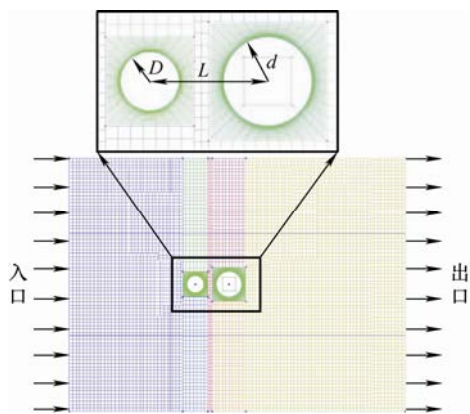
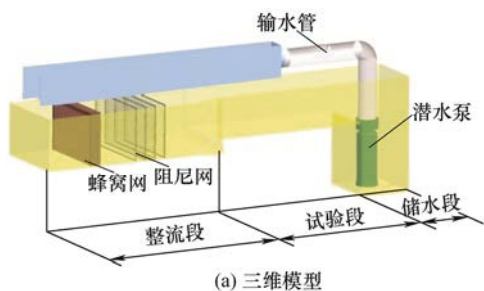


图3 压电俘能器有限元模型

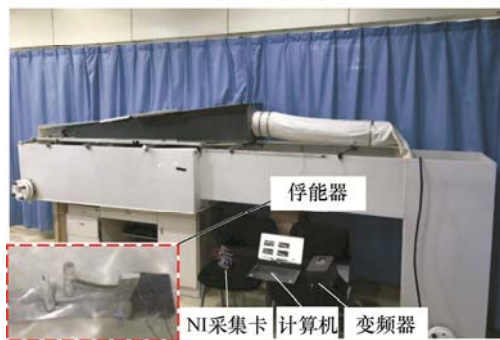
### 3 仿真与试验对比验证

#### 3.1 试验系统

图4为压电俘能器水洞试验系统。该试验系统由变频器调节潜水泵转速从而控制水流速,潜水泵输出的水流量经过输水管进入水洞的整流段,通过整流段的蜂窝网和阻尼网使水流稳定后流经放置俘能器的试验段,水流最后再回到储水段由潜水泵再次输出,依次循环,构成一套完整的试验系统。试验段流速调节范围为  $0 \sim 0.47$  m/s,试验数据由NI采集卡和电脑储存处理,能够实现实时采集、显示和记录输出电压。由于该俘能器完全潜入在水中,故对其压电片MFC引线部分缠绕防水胶带以保证装置的绝缘性能,使其输出更稳定。



(a) 三维模型



(b) 实物模式

图4 压电俘能器水洞试验系统

为了探索固定柱和振动柱的直径对俘能器输出性能的影响,分别讨论固定柱直径  $D$  为

5/10/15/20/25 mm,振动柱直径  $d$  选取为 20 mm 和 25 mm。定义俘能器系统代号为 PEH\_ $D$ \_ $d$ 。

图5表示无固定柱时俘能器在试验和仿真获得的输出电压随流速的变化曲线,其中输出电压指的是方均根值。由图5的曲线数据可知,流速在  $0.1 \sim 0.3$  m/s 时,仿真与试验数据近似重合,在流速高于  $0.3$  m/s 后,仿真数据较为平滑,而试验数据呈现轻微波动,主要原因在于当水流经过时,俘能器不仅受由振动柱产生的涡激力,而且悬臂梁也受水流冲击力。随着悬臂梁弯曲程度增大,所受水流冲击力也随之变大,导致悬臂梁加大弯曲程度,从而致使俘能器输出电压高于仅由涡激力作用时的输出电压。随着水流速的增加,水槽内流速不稳,这也是导致试验曲线在高流速时出现波动的原因。由图5a可知,PEH\_00\_15的峰值电压误差仅为 5.18%,在试验数据最高流速下时,输出电压误差为 9.78%;由图5b可知,PEH\_00\_20的峰值电压误差 12.12%,最高流速下输出电压误差为 14.32%。以上的误差均在误差允许范围之内,故仿真数据仍能较准确地预测俘能器输出性能与流速的规律关系。

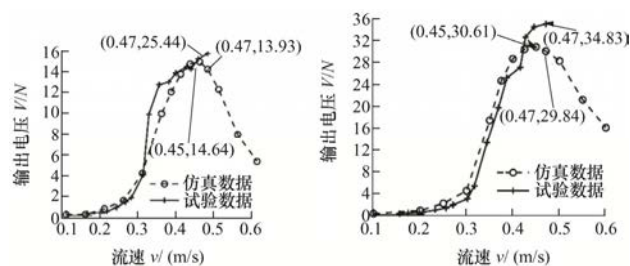
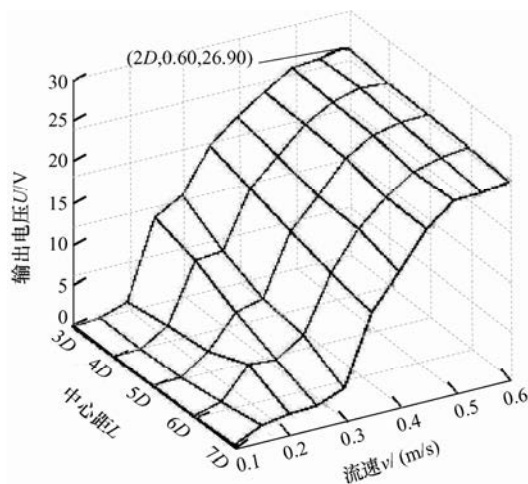


图5 PEH\_00\_15、PEH\_00\_20 试验与仿真对比

#### 3.2 振动柱 $d = 15$ mm 时输出特性

当振动柱直径  $d = 15$  mm 时,固定柱直径  $D$  及两柱中心距  $L$  对俘能器输出性能影响曲线如图6~10所示。



(a) PEH\_10\_15 仿真结果



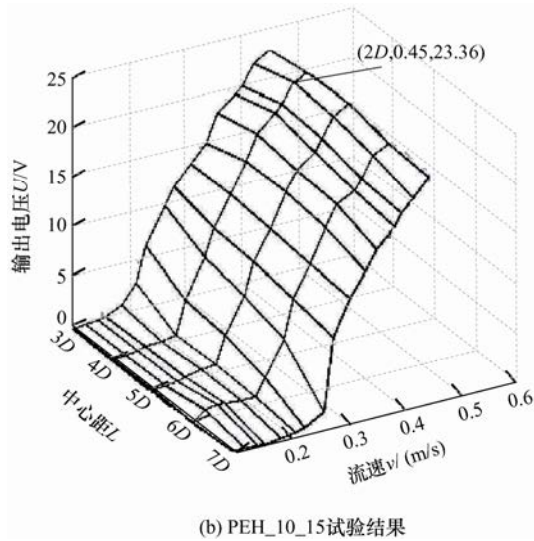


图6 PEH\_05\_15 输出随中心距与流速变化的曲面图

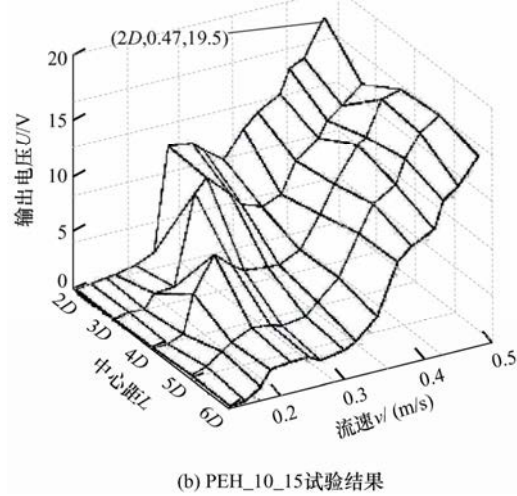
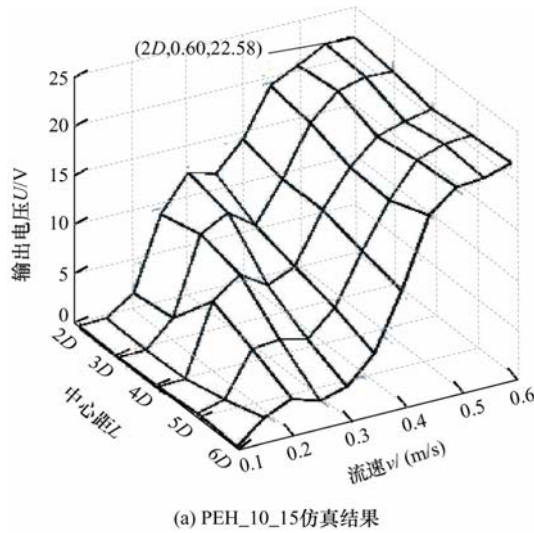


图7 PEH\_10\_15 输出随中心距与流速变化的曲面图

由图 6~10 可知, 尾流激振俘能系统在 0~0.3 m/s 的水流场中, 系统输出电压均随流速的增大

而增大, 此规律与两柱中心距的设置无关。但当流速大于 0.3 m/s 时, 此时不同的俘能系统呈现不同规律。PEH\_05\_15 俘能器输出电压随着流速增加而增大, 在高流速段时, 系统输出趋于平稳, 此时是尾流激振作为主要流激力, 随着中心距增加, 同流速下的系统输出电压呈下降趋势, 说明固定柱可以有效提高系统输出性能。PEH\_10\_15 俘能器会在 0.25 m/s 流速下出现一个峰值, 而后再次上升并趋于平稳, 系统在第一次峰值处主要受流体涡激力的影响, 振动形式为涡激振动, 而后随着流速增加, 系统呈现尾流激振的振动形式。PEH\_15\_15 俘能器的输出电压随流速增加先增大后减小, 存在一个较为明显的峰值, 并且俘能器受中心距的影响也较大。PEH\_15\_15 系统整体以涡激振动形式为主, 而通过图 8a 仿真数据可以发现, 在流速大于 0.5 m/s 时, 系统输出趋于平稳, 此时以尾流激振为主要振动模

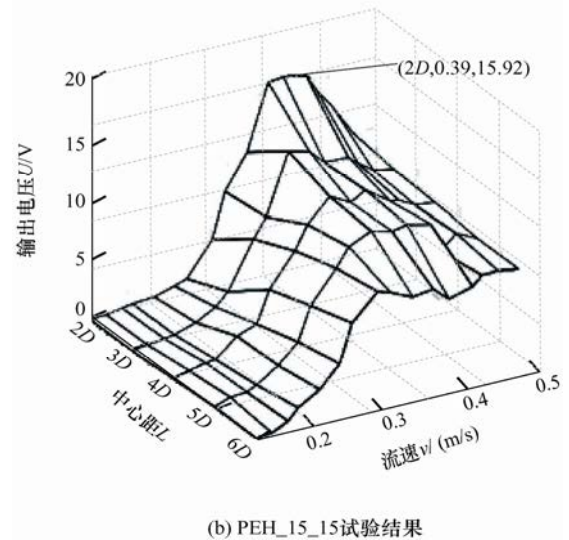
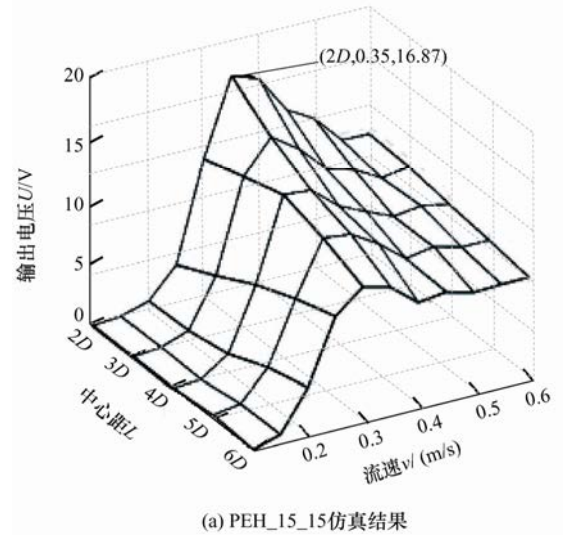
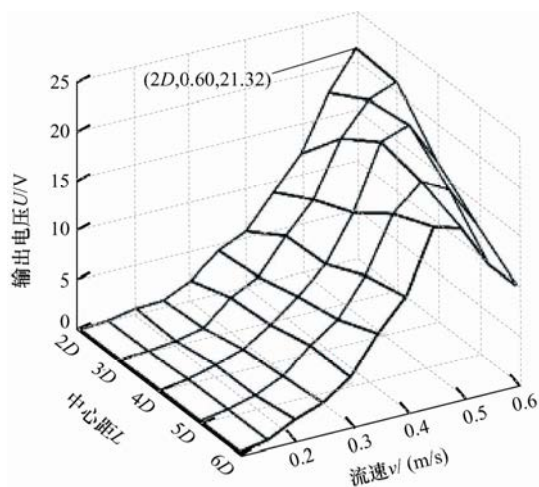
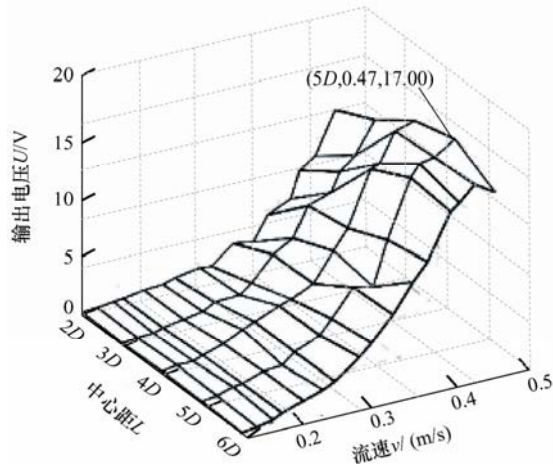


图8 PEH\_15\_15 输出随中心距与流速变化的曲面图

式。根据图9和图10可知,PEH\_20\_15和PEH\_25\_15系统的涡激振动较为滞后,在低流速情况下,输出效果不明显,在高流速情况下,系统输出性能受两柱间距影响也较大。

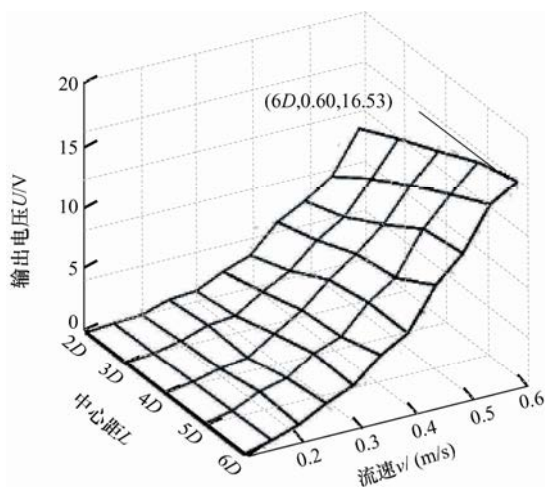


(a) PEH\_20\_15仿真结果

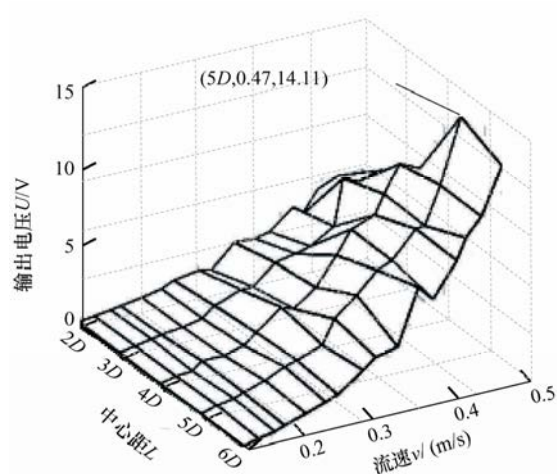


(b) PEH\_20\_15试验结果

图9 PEH\_20\_15 输出随中心距与流速变化的曲面图



(a) PEH\_25\_15仿真结果

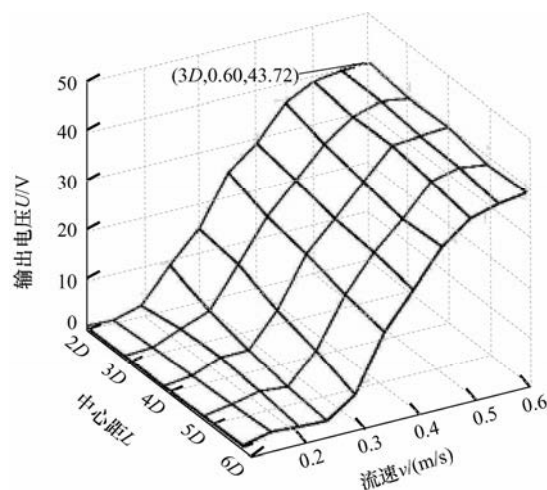


(b) PEH\_25\_15试验结果

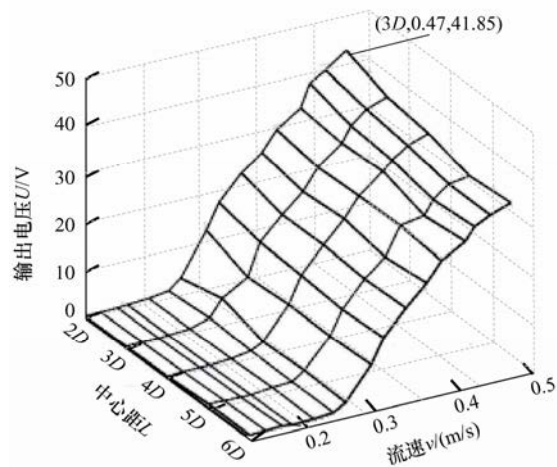
图10 PEH\_25\_15 输出随中心距与流速变化的曲面图

### 3.3 振动柱 $d = 20 \text{ mm}$ 时输出特性

当振动柱直径  $d = 20 \text{ mm}$  时,固定柱直径  $D$  及两柱中心距  $L$  对俘能器输出性能影响曲线如图11~15所示。



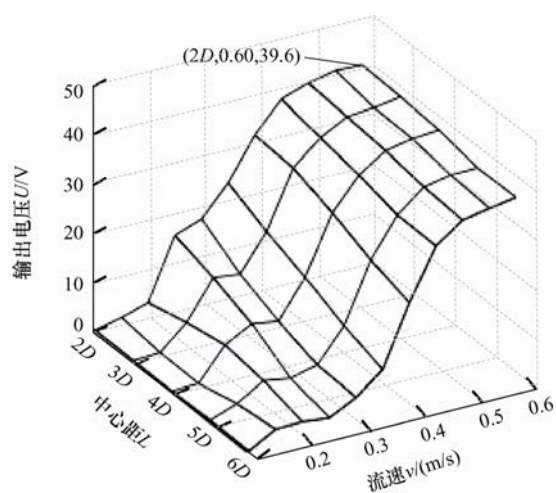
(a) PEH\_05\_20仿真结果



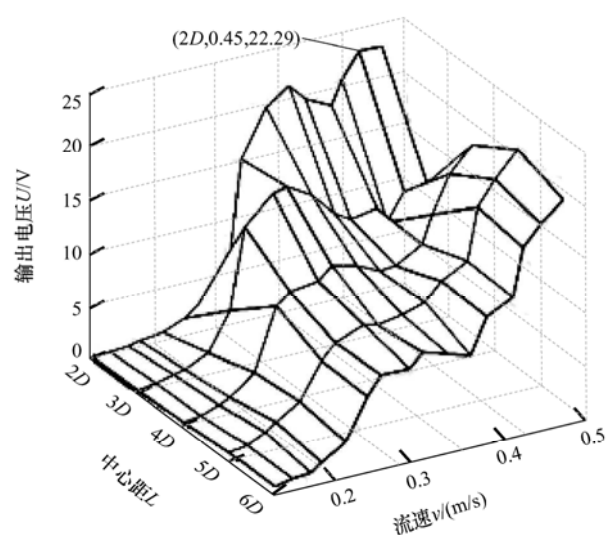
(b) PEH\_05\_20试验结果

图11 PEH\_05\_20 输出随中心距与流速变化的曲面图

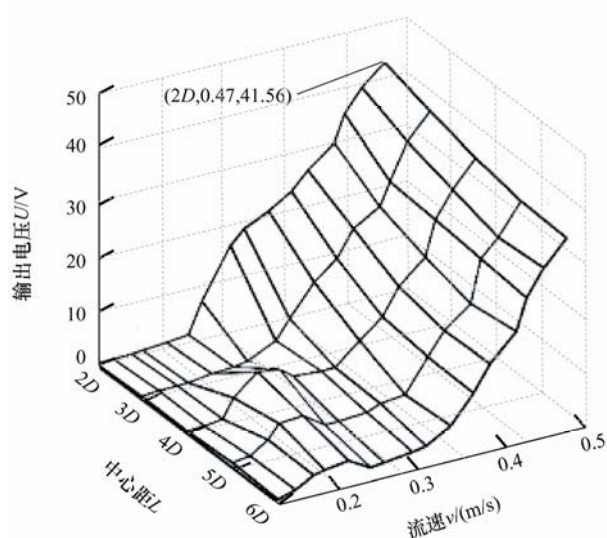




(a) PEH\_10\_20 仿真结果

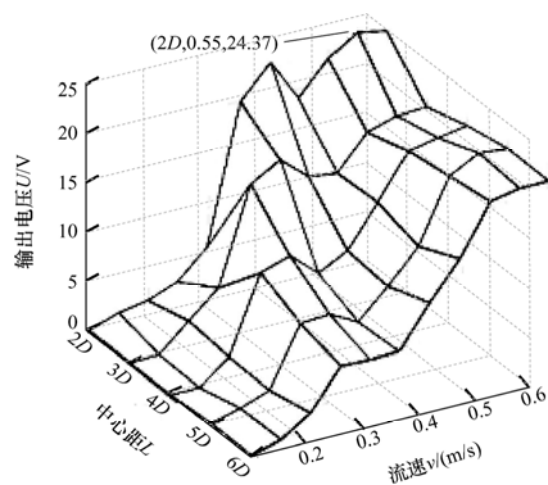


(b) PEH\_15\_20 试验结果

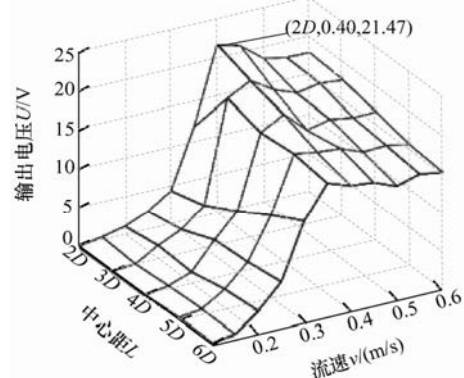


(b) PEH\_10\_20 试验结果

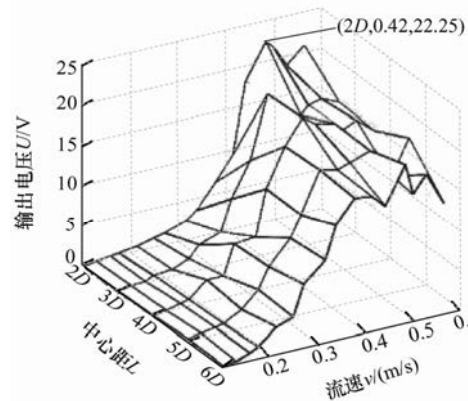
图 12 PEH\_10\_20 输出随中心距与流速变化的曲面图



(a) PEH\_15\_20 仿真结果



(a) PEH\_20\_20 仿真结果



(b) PEH\_20\_20 试验结果

图 14 PEH\_20\_20 输出随中心距与流速变化的曲面图

由图 11~15 可知, PEH\_05\_20 俘能器与 PEH\_05\_15 俘能器的输出规律相似, 但 PEH\_05\_20 的峰值输出电压要比 PEH\_05\_15 提高很多。PEH\_10\_20 俘能器与 PEH\_10\_15 俘能器规律类似, 存在一个极值点, 此处主要振动模式为涡激振动, 随着流速增加, 系统在高流速下输出趋于平稳, 此时为尾流激振模式。图 13~15 结果表明, 随着固定柱直径增大, 系统出现涡激振动流速点滞后, 且输

出性能受中心距影响波动大。为了便于比较不同结构参数对其俘能器的输出性能的影响,图 16 表示为峰值电压和提升率变化曲线。通过图 16a、16b 可知,无论试验数据还是仿真数据都表示当振动柱尺寸一定时,俘能器的输出电压随着固定柱直径的增加而整体呈现下降趋势,而且当固定柱和振动柱直径相等时,存在极小值点,说明对俘能器系统的输出性能具有抑制作用,在今后实际应用中应避免此类设计。当振动柱直径为 15 mm 时,虽然系统有下降趋势,但其整体输出性能均高于 PEH\_00\_15,说明固定柱可以提高系统的输出性能。通过曲线变化程度可以看到,当固定柱直径从 5 mm 增大到 15 mm 过程中,俘能器的输出性能变化波动较大,当直径大于 15 mm 时,曲线变化较为平缓,说明小直径固定柱对系统的输出影响较大。图 16c 表明相同直径振动柱的俘能器仿真数据和试验数据的变化趋势相近,这也验证了本文数学模型和仿真的正确性。通过试验数据对比可以看出,PEH\_05\_15 俘能器在中心距为 20 mm 时输出电压最大为 23.36 V,同比 PEH\_00\_15 俘能器峰值电压提升率为 51.3%。PEH\_05\_20 俘能器在中心距为 15 mm 时输出电压最大为 41.85 V,同比 PEH\_00\_15 俘能器峰值电压提升率为 21.16%。

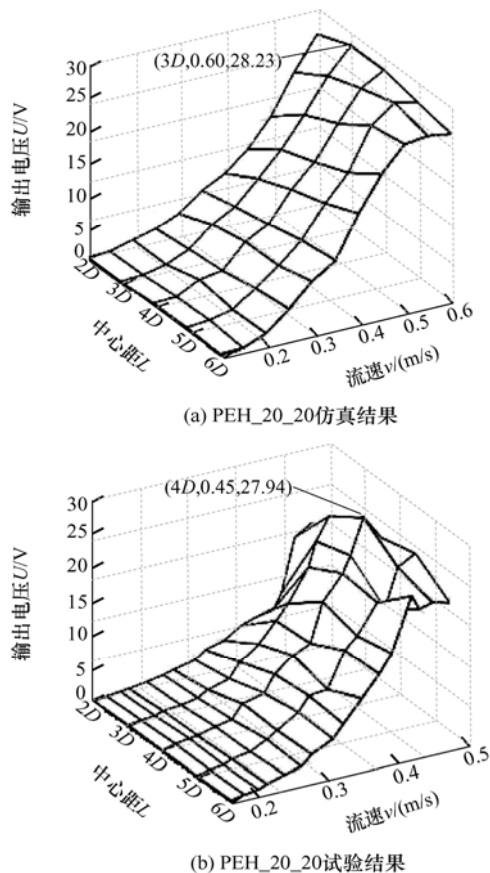


图 15 PEH\_25\_20 输出随中心距与流速变化的曲面图

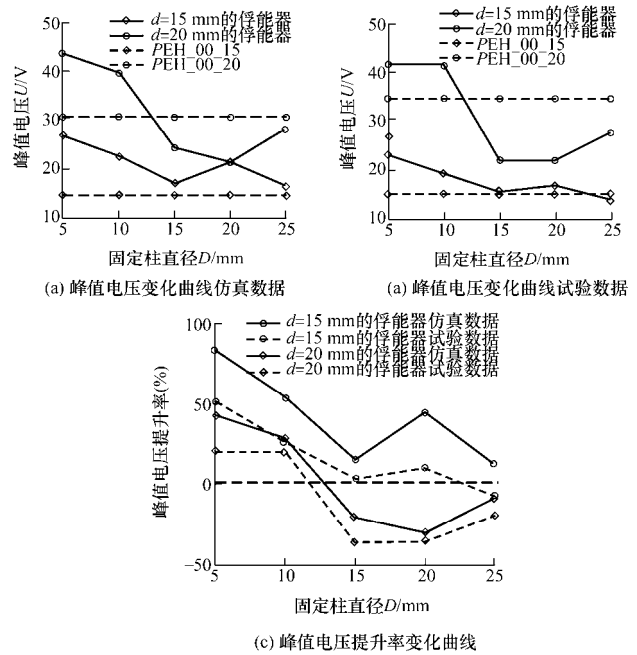


图 16 不同结构俘能器输出性能对比曲线

## 4 结论

本文提出了一种潜式尾流激振压电俘能器,推导了压电俘能器的流-固-电耦合场的数学模型。结合 UDF 和 CFD,建立了流场中的压电俘能器有限元仿真模型。搭建试验平台,制作了压电俘能器的试验样机,进行了试验验证和对比分析。试验结果表明,仿真分析所获得的输出电压数据与试验数据具有良好的一致性,验证了数学模型和仿真的正确性。对于振动柱直径为 15 mm 的俘能器,增加固定柱可以有效的提高俘能器整体的输出性能。当两柱中心距为 4D 时,PEH\_05\_15 俘能器输出电压最大为 23.36 V,同比 PEH\_00\_15 俘能器峰值电压提升率为 51.3%。PEH\_05\_20 俘能器在中心距为 3D 时输出电压最大为 41.85 V,同比无固定柱俘能器的峰值电压提升率为 21.16%。本文研究结果可以为水下传感器实现自供电应用提供了重要的理论基础。

## 参考文献

- [1] 薛晨阳, 张浩凌, 崔娟, 等. 基于复合振动能量采集器的自供电无线传感微系统研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 57-64.
- XUE Chenyang, ZHANG Haoling, CUI Juan, et al. Research on the self-powered wireless sensor micro-system based on the hybrid vibration energy harvester[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 57-64.



- [2] LIU H, FU H, SUN L, et al. Hybrid energy harvesting technology: From materials, structural design, system integration to applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110473.
- [3] YANG Z, ZHOU S, ZU J, et al. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications[J]. *Joule*, 2018, 2(4): 642-697.
- [4] 王淑云, 朱雅娜, 阚君武, 等. 限幅激励式压电发电机性能分析与试验[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(20): 206-213.  
WANG Shuyun, ZHU Yana, KAN Junwu, et al. Structure and performance of piezoelectric generator with amplitude limit[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 206-213.
- [5] WANG S, YANG Z, KAN J, et al. Design and characterization of an amplitude-limiting rotational piezoelectric energy harvester excited by a radially dragged magnetic force[J]. *Renewable Energy*, 2021, 177: 1382-1393.
- [6] ZHANG H, SUI W, YANG C, et al. An asymmetric magnetic-coupled bending-torsion piezoelectric energy harvester: Modeling and experimental investigation[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31: 015037.
- [7] LIU R, XU Z, JIN Y, et al. Design and research on a nonlinear 2DOF electromagnetic energy harvester with velocity amplification[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 159947-159955.
- [8] XU Z, YANG H, ZHANG H, et al. Design and analysis of a magnetically coupled multi-frequency hybrid energy harvester[J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3203.
- [9] FAN K, XIA P, ZHANG Y, et al. Achieving high electric outputs from low-frequency motions through a double-string-spun rotor[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 155: 107648.
- [10] 王东伟, 刘明星, 吴霄, 等. 压电式摩擦振动能量收集的试验研究与仿真分析[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(9): 89-98.  
WANG Dongwei, LIU Mingxing, WU Xiao, et al. Experimental and numerical study on the response characteristics of piezoelectric energy harvester via friction-induced vibration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(9): 89-98.
- [11] TAO K, CHEN Z, YI H, et al. Hierarchical honeycomb-structured electret/triboelectric nanogenerator for biomechanical and morphing wing energy harvesting[J]. *Nano-Micro Letters*, 2021, 13(1): 123.
- [12] TAO K, YI H, YANG Y, et al. Miura-origami-inspired electret/triboelectric power generator for wearable energy harvesting with water-proof capability[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2020, 6(1): 56.
- [13] SU W, LIN W. Design and analysis of a vortex-induced bi-directional piezoelectric energy harvester[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 173: 105457.
- [14] ZHANG M, ZHANG C, ABDELKEFI A, et al. Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibration of a circular cylinder: Effect of Reynolds number[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235: 109378.
- [15] ZHANG C, HU G, YURCHENKO D, et al. Machine learning based prediction of piezoelectric energy harvesting from wake galloping[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 160: 107876.
- [16] MUJTABA A, LATIF U, UDDIN E, et al. Hydrodynamic energy harvesting analysis of two piezoelectric tandem flags under influence of upstream body's wakes[J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116173.
- [17] LI K, YANG Z, ZHOU S. Performance enhancement for a magnetic-coupled bi-stable flutter-based energy harvester[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(8): 85045.
- [18] ROCCIA B A, VERSTRAETE M L, CEBALLOS L R, et al. Computational study on aerodynamically coupled piezoelectric harvesters[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(13): 1578-1593.
- [19] ZHANG M, ABDELKEFI A, YU H, et al. Predefined angle of attack and corner shape effects on the effectiveness of square-shaped galloping energy harvesters[J]. *Applied Energy*, 2021, 302: 117522.
- [20] TAN T, ZUO L, YAN Z. Environment coupled piezoelectric galloping wind energy harvesting[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 323: 112641.
- [21] WANG Y, ZHOU Z, QIN W, et al. Harvesting wind energy with a bi-stable configuration integrating vortex-induced vibration and galloping[J]. *Journal of physics. D, Applied Physics*, 2021, 54(28): 285501.
- [22] WANG J, GU S, ABDELKEFI A, et al. Enhancing piezoelectric energy harvesting from the flow-induced vibration of a circular cylinder using dual splitters[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(5): 05LT01.
- [23] KAN J, LIAO W, WANG J, et al. Enhanced piezoelectric wind-induced vibration energy harvester via the interplay between cylindrical shell and diamond-shaped baffle[J].

- Nano Energy, 2021, 89: 106466.
- [24] USMAN M, HANIF A, KIM I, et al. Experimental validation of a novel piezoelectric energy harvesting system employing wake galloping phenomenon for a broad wind spectrum[J]. Energy, 2018, 153: 882-889.
- [25] REZAEI M, TALEBITOOTI R. Wideband PZT energy harvesting from the wake of a bluff body in varying flow speeds[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 163: 105135.
- [26] 宋汝君, 单小彪, 李晋哲, 等. 压电俘能器涡激振动俘能的建模与试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 55-60, 79.
- SONG Rujun, SHAN Xiaobiao, LI Jinzhe, et al. Modeling and experimental study of piezoelectric energy harvester under vortex-induced vibration[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 55-60, 79.
- [27] HU Y, MOU F, YANG B, et al. A broadband E-shaped piezoelectric energy harvester based on vortex-shedding induced vibration from low velocity liquid flow[J]. AIP Advances, 2018, 8(12): 125214.
- [28] BINYET E M, CHANG J, HUANG C. Flexible plate in the wake of a square cylinder for piezoelectric energy harvesting—parametric study using fluid-structure interaction modeling[J]. Energies, 2020, 13(10): 2645.
- [29] SONG R, HOU C, YANG C, et al. Modeling, validation, and performance of two tandem cylinder piezoelectric energy harvesters in water flow[J]. Micromachines, 2021, 12(8): 872.
- [30] SHAN X, LI H, YANG Y, et al. Enhancing the performance of an underwater piezoelectric energy harvester based on flow-induced vibration[J]. Energy, 2019, 172: 134-140.
- [31] ZHAO D, ZHOU J, TAN T, et al. Hydrokinetic piezoelectric energy harvesting by wake induced vibration[J]. Energy, 2021, 220: 119722.
- [32] VAN EYSDEN C A, SADER J E. Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope: Arbitrary mode order[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(4): 44908.

作者简介: 单小彪(通信作者), 男, 1978 年出生, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为俘能技术和抑振技术。  
E-mail: shanxiaobiao@hit.edu.cn