

# 尾鳍式压电泵尾鳍形状优化、模拟及实验\*

胡笑奇<sup>1</sup>, 李 垚<sup>2</sup>, 纪 晶<sup>2</sup>, 胡彩旗<sup>2</sup>, 赵 伟<sup>2</sup>

(1. 枣庄学院机电工程学院 枣庄, 277160)

(2. 青岛农业大学机电工程学院 青岛, 266109)

**摘要** 尾鳍仿生结构是形成尾鳍式压电泵泵送效应的关键部件,受到多种生物鱼尾结构的启发,提出了内三角形、弯月形、扇形和梯形等形状的尾鳍,并对其进行研究和对比。首先,在 ANSYS Workbench 软件平台对振子进行了振动分析,并基于响应面法优化了尾鳍形状参数;其次,基于 COMSOL 软件进行了振子在泵腔内的流固耦合分析,模拟了泵出口端的泵流量;最后,进行了流量测试实验,绘制了泵的流量-频率曲线。结果表明:优化后的上述4种形状尾鳍振子的振幅依次提高了233%,100%,78%和138%;4种尾鳍振子的泵流量比优化前分别提高了43%,20%, -27%和87%;实测流量分别提高了48.7%,20.6%, -21.2%和101.5%,变化趋势和模拟值趋同。

**关键词** 压电;无阀泵;仿生结构;摆动振子

**中图分类号** TH35;TH38

## 引 言

无阀压电泵具有结构简单、无回流、无接触磨损污染等优点,在电子器件散热<sup>[1-2]</sup>、农业滴灌<sup>[3-4]</sup>、生物医疗<sup>[5-6]</sup>等领域具有广泛的应用前景。文献[5,7]利用压电双晶片驱动的压电振子构建仿尾鳍摆动效应,并将其用于LED灯的冷却<sup>[8]</sup>,但相对于鱼体,尾鳍特征不明显。胡笑奇等<sup>[9]</sup>利用刚柔结构构建摆动振子,提出了压电叠堆泵,泵送效应明显提升。Hales等<sup>[2]</sup>对压电双晶片驱动的压电风扇进行了数值模拟和实验研究,发现多组压电振子同相振动时能够产生较大的风速。陈文华<sup>[10]</sup>以压电纤维作为驱动元件,研制了左进右出、左进上出、上进右出3种结构形式的摆动式压电泵。Hu等<sup>[11]</sup>求得了压电振子动力学模型的近似解,给出了压电陶瓷片的最佳粘贴位置,并通过构建伪刚体模型,解释压电泵在工作过程中的实验现象<sup>[12]</sup>。

柔性尾鳍结构作为仿生结构的驱动部件,其形状对压电泵驱动能力和驱动效率具有很大的影响。程建宇等<sup>[13]</sup>提出了尾鳍推进的理论模型,并给出了6种尾型求解方法。王田苗等<sup>[14-15]</sup>提出了射流和诱导速度的量化假设。张曦等<sup>[16]</sup>基于实验方法分析了仿金枪鱼、仿海豚、仿白鲸3种尾鳍的推进性能,通过数值模拟给出了最优解。由于机器鱼和仿尾鳍摆动振子在运动形态、工作空间存在着巨大的不同,现

有的机器鱼理论模型和分析方法尚不能完全应用于仿尾鳍泵的研究。

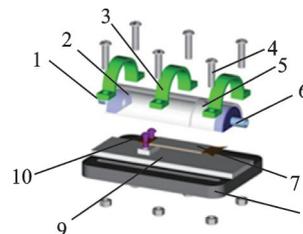
不同的尾鳍形状蕴含着不同的流体动力学原理。为了研究不同形状尾鳍振子的驱动能力,笔者以褐梅鲷、黄金吊、斜带石斑鱼及金枪鱼为原型,对应提出内三角形、梯形、扇形及弯月形等形状尾鳍,对其进行振动分析、流固耦合分析和实验研究,为泵振子的优化设计提供依据。

## 1 泵及振子的结构形式

### 1.1 泵的整体结构

泵的结构示意图如图1所示,由泵底座、泵上盖、紧固结构、压电摆动振子等部件组成。

为了使该类型泵能够在管道中工作以形成滴灌



1-进液管;2-第1腔体;3-卡箍;4-腔体固定螺栓;5-第2腔体;6-出液管;7-仿尾鳍式压电振子;8-底板;9-硅胶垫片;10-振子固定螺栓

图1 泵的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the pump

\* 国家自然科学基金资助项目(31971801,51475221);山东省自然科学基金资助项目(ZR2020ME252,ZR2020ME250)  
收稿日期:2023-02-16;修回日期:2023-04-10

功能,将泵腔设计成半圆形。根据整个摆动振子的功能划分,压电双晶片部分是驱动部,其作用是将电能转换为机械能;尾鳍部分是执行部,其作用是将振子的动能转换为流体的动能,故尾鳍的形状对泵的性能具有较大影响。为提高尾鳍的展弦比,将其设计为异形而不是常规的矩形。在供给能量不变的情况下,压电摆动振子的影响域需限定在一定的范围内。由于尾鳍的翼展即宽度变大,将泵腔设计为两部分:①后端的压电双晶片部分;②前端尾鳍部分。在保持后端腔体不变的情况下,适当增加前端腔体的大小,即进行变腔体设计。该设计不但能够契合翼展在端部的突然变大,还能减少前端流体的回流。底座和上盖之间用胶垫进行密封,并用卡箍进行紧固连接,通过改变胶垫厚度,灵活改变腔体的空间。

1.2 摆动振子的结构参数

压电陶瓷片 PZT 和铜片基体进行粘接,构成压电双晶片结构。压电陶瓷采用 PZT-8,基体和尾鳍采用磷青铜。PZT 在交变电场的作用下,产生伸缩变形并引起压电双晶片的摆动振动,从而带动柔性尾鳍的摆动。仿尾鳍式振子结构示意图见图 2。

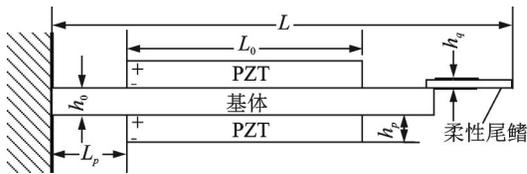


图2 仿尾鳍式振子结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of caudal-fin vibrator structure

除尾鳍形状外,仿尾鳍式振子固定参数见表 1。

表 1 仿尾鳍式振子固定参数

参数	$L$	$L_0$	$h_0$	$h_p$	$h_q$	$L_p$
尺寸/mm	66	44	0.4	0.4	0.1	10

2 尾鳍形状设计

尾鳍是产生泵送效应的执行部件,其形状结构直接影响到泵送效率。笔者在前期的研究中采用矩形尾鳍,其宽度和压电双晶片基体一致。在研究生物鱼尾的结构特点时发现,纺锤形的鱼体躯干部和尾部的连接有明显的尾柄结构,和矩形尾鳍相比,展弦比显著增大,是一种高效的生物体结构。

2.1 尾鳍运动轨迹及驱动特性分析

尾鳍在基体的带动下运动,可以看做是绕基体

端部宽度方向(y向)的俯仰运动和流体深度方向(z向)的升沉运动二者的合运动。沉浮运动的速度和俯仰运动的角速度为

$$\begin{cases} V_z(t) = 2\pi f A_z \cos(2\pi f t) \\ \omega(t) = 2\pi f \theta_0 \cos(2\pi f t + \varphi_0) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $A_z$ 为沉浮幅度; $\theta_0$ 为俯仰摆动幅度; $\varphi_0$ 为俯仰运动和沉浮运动的相位差。

影响尾鳍水动力性能的特劳哈鲁数 Sr 为

$$Sr = fb / |v_0| \quad (2)$$

其中: $b$ 为运动过程中脱落尾涡的宽度,其值可近似表示为沉浮运动振幅的量; $v_0$ 为流体流动速度。

推力系数  $C_x$ 、侧向力系数  $C_z$  以及力矩系数  $C_m$  可通过尾鳍的表面压力系数  $C_p$  得到,即

$$\begin{cases} C_x = \iint_{S_b} C_p n_x dS \\ C_z = \iint_{S_b} C_p n_z dS \\ C_m = \iint_{S_b} C_p (x n_z - z n_x) dS \end{cases} \quad (3)$$

其中: $n_x, n_z$ 为指向外部流场的尾鳍表面法向的分量; $S_b$ 为尾鳍的表面积。

推进效率可表示为

$$\eta = \frac{C_{xm} |v_0|}{\left[ \int_0^T C_z z(t) dt + \int_0^T C_m \theta'(t) dt \right] f} \quad (4)$$

其中: $C_{xm}$ 为  $C_x$  在一个运动周期的平均值。

2.2 尾鳍形状仿生

式(3)和式(4)表明,尾鳍的驱动效应除了和运动参数相关以外,还与其形状参数相关,形状各异、不同种类的鱼类有着不同的驱动特性。本研究选取褐梅鲷、金枪鱼、斜带石斑鱼及黄金吊等 4 种鱼类作为参考,设计了 4 种尾鳍的结构形状,分别为内三角形、弯月形、扇形和梯形。尾鳍结构设计图见图 3。

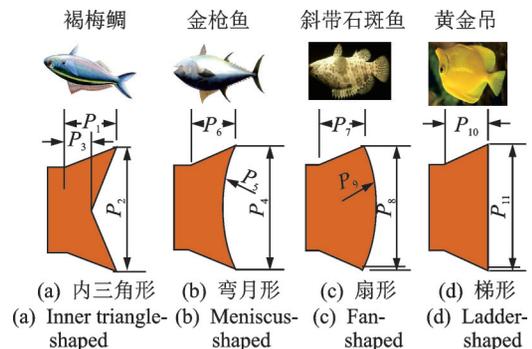


图3 尾鳍结构设计图

Fig.3 Structure design drawing of caudal-fin

尾鳍初始参数见表2。和矩形振子相比,这一类变宽度尾鳍的翼展有了明显的增大。笔者通过数值模拟和实验研究,探索这几种典型结构的泵送能力。

表2 尾鳍初始参数  
Tab.2 Caudal fin parameter table

参数	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
尺寸/mm	6	25	3	25	R70	6
参数	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	
尺寸/mm	6	25	R70	6	25	

### 3 结构和流场的数值模拟

#### 3.1 振子模态分析及谐响应分析

在 ANSYS Workbench 平台对其进行湿模态分析,由于上述4种振子具有形状上的相似性,仅取内三角形的压电振子的模态分析结果为例:1阶弯振的谐振频率为96.277 Hz;2阶弯振为692.26 Hz;下一阶次的振型为扭振,其谐振频率为910.58 Hz;4阶及以上振型振幅较小,不对其进行深入研究。

由于双晶片振子的变形特征是上下两个陶瓷片一个拉伸、一个收缩,只有2阶弯曲振型和其受力形变的形状相吻合,因此2阶弯振是最佳工作振型;1阶振型能够产生一定幅度的摆动,但其机电耦合系数较低,泵送能力差;扭振对于流体泵送无贡献,容易成为干扰模态,因此在设计中要注意扭振谐振频率和工作频率的间距。

采用完全求解法对4种尾鳍形状的压电振子进行谐响应分析。振子工作频率及相应的振幅结果见表3。在150 V电压的驱动下,根据分析结果,弯月形尾鳍的端部振幅最大,为0.88 mm;内三角形尾鳍的端部振幅最小,为0.58 mm。

表3 振子工作频率及相应的振幅结果  
Tab.3 Results of amplitude and working frequency of vibrators

振子尾鳍形状	谐振频率/Hz	振幅/mm
内三角形	697.0	0.58
弯月形	633.6	0.88
扇形	480.0	0.61
梯形	550.0	0.78

#### 3.2 尾鳍形状初始参数

在 ANSYS 平台中,优化设计是基于响应面完成的,其具体过程是利用抽样技术采集设计变量参

数,计算每个点的响应结果,再利用二次差值函数构造设计空间的响应面或曲线。通过优化设计可以得到尾鳍的最佳形状,以提升泵送效率,更好地预测设计规律。本研究的设计变量是压电振子尾鳍的尺寸,将振子端部为目标函数,振子的工作频率作为约束条件,以期求得样本的最佳组合。将图3所示的 $P_1 \sim P_{10}$ 作为设计变量,先赋予原始尺寸,在此基础上设定一个变动范围。设计变量的取值范围见表4。

表4 设计变量的取值范围  
Tab.4 Range of design variables

设计变量	原始尺寸/mm	取值范围/mm
$P_1$	6	4~8
$P_2$	25	23~27
$P_3$	3	2~4
$P_4$	25	23~27
$P_5$	R70	60~80
$P_6$	6	4~8
$P_7$	6	4~8
$P_8$	25	23~27
$P_9$	R70	60~80
$P_{10}$	6	4~8
$P_{11}$	25	23~27

#### 3.3 参数灵敏度分析

采用最优空间填充的方式进行样本抽样,生成实验设计点,进而运用克里金法(Kriging)将样本点拟合成响应面,从而可以得出设计变量与优化目标的灵敏度柱状图。研究表明,端部振幅和工作频率对于泵送性能具有较大的影响,因此将此二者作为目标函数来进行分析。

图4为4种尾鳍输入参数对输出参数的灵敏度

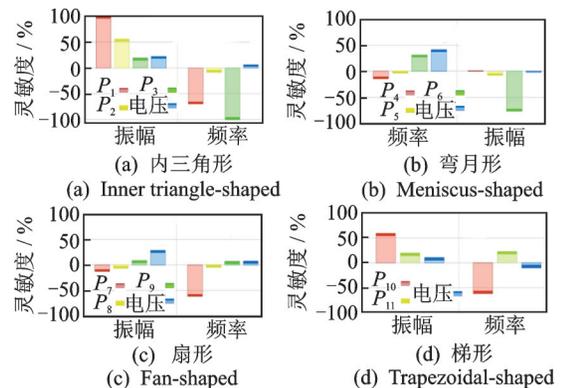


图4 4种尾鳍输入参数对输出参数的灵敏度分析结果  
Fig.4 Analysis results of the sensitivity of four tail-fins input parameters to output parameters

分析结果。由图 4(a)可知,内三角形尾鳍长度  $P_1$ 、尾鳍宽度  $P_2$  与振幅的敏感度绝对值较大,对频率影响较大的参数则是尾鳍长度  $P_1$  和尾鳍中心长度  $P_3$ ,而尾鳍宽度  $P_2$  与电压几乎不会影响振子的频率。由图 4(b)可知,弯月形尾鳍的长度  $P_6$  对振幅的影响较大,和电压与振幅呈正相关,其余参数与振幅和频率呈负相关。由图 4(c)可知,扇形尾鳍对振幅影响最大的是尾部外圆弧的半径  $P_9$ ,呈正相关的关系;对频率影响最明显的则是长度  $P_7$ ,与频率呈负相关的关系。由图 4(d)可知,对振幅影响较为显著的参数为长度  $P_{10}$  与宽度  $P_{11}$ ,呈正相关;对频率影响较大的也是  $P_{10}$  和  $P_{11}$ ,但  $P_{10}$  与频率呈负相关, $P_{11}$  则与频率呈正相关。

### 3.4 响应面分析

根据 3.3 节的分析结果,针对振幅响应面的生成,设计变量做如下选择:内三角形尾鳍选取尾鳍长度  $P_1$ 、尾鳍宽度  $P_2$ ;弯月形尾鳍选取尾鳍宽度  $P_4$ 、长度  $P_6$ ;扇形尾鳍选取尾鳍长度  $P_7$ 、圆弧半径  $P_9$ ;梯形尾鳍选取尾鳍长度  $P_{10}$ 、宽度  $P_{11}$ 。4 种尾鳍振子的振幅响应面分析结果如图 5 所示。

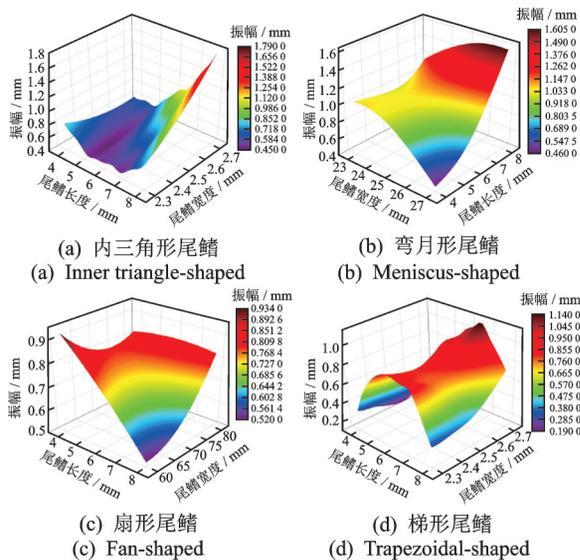


图 5 4 种尾鳍振子的振幅响应面分析结果

Fig.5 Response surface analysis of 4 kinds of vibrators

图 5 表明:内三角尾鳍的  $P_1$ 、弯月形尾鳍的  $P_6$  对振幅的影响是随着尾鳍总长度的增加,振幅单向增加,没有出现拐点;对于扇形尾鳍的影响则是单向减小;对于梯形尾鳍的影响呈现出振幅先增加后减小的趋势,出现了极值。分析其原因如下:内三角形和弯月形的尾鳍随总长度的增加,由于尾鳍存在内凹,质量增加相对不明显,符合板梁结构的振

动规律,端部振幅则随着总长度的增加而增加;尾鳍总宽度的增加会使尾鳍的两侧变尖,有助于提高端部振幅,这在内三角形、弯月形和梯形等形状上有所表现;在尾鳍外凸的形状方面,变化趋势较为复杂,圆弧半径  $P_{11}$  随着尾鳍长度  $P_{10}$  的变化而变化。尾鳍振子的优化结果如表 5 所示。

表 5 尾鳍振子的优化结果

Tab.5 The optimized scheme of flying fish-shaped tail fin vibrator

尾鳍形状	$P/\text{mm}$	振幅/mm	$f/\text{Hz}$
内三角形	$8(P_1)$ $27(P_2)$ $4(P_3)$	1.934 0	636.77
弯月形	$25.8(P_4)$ $61(P_5)$ $8(P_6)$	2.092 6	498.95
扇形	$8(P_7)$ $27(P_8)$ $80(P_9)$	1.328 4	392.25
梯形	$6.8(P_{10})$ $26.6(P_{11})$	1.220 9	487.64

对比表 3 和表 5,4 种形状的尾鳍经过优化后,端部振幅都有大幅度的提升,其中内三角形、弯月形、扇形及梯形尾鳍分别增加了 233%,138%,78% 和 100%。优化后的频率则呈现出有增有减的态势,其中内三角形、弯月形和扇形谐振频率有所降低,而梯形则有所增加。

### 3.5 流量模拟

振子的结构为刚柔结构,压电双晶片部分的质量和刚度要远远大于尾鳍部分。柔性的尾鳍在驱动流体的过程中受到阻力作用会产生顺应流场的变形,由于其刚度较小,这种变形不能被忽视。因此,在进行流固耦合分析时,其属于典型的双向耦合,即尾鳍在对流场进行作用的同时还受到流体的反作用力的影响。

本研究利用多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics 对优化前后的半圆柱变腔体压电泵进行流固耦合分析,并对流量进行模拟,以验证结构优化的有效性。在三维 CAD 模型 Solidworks 中构建几何模型,再导入到 COMSOL 中。流体域采用动网格设置,驱动电压设为 150 V,激励频率由振子的谐响应分析得出,流固耦合面为压电振子域与流体接触的所有面,分析模式为瞬态分析。时间步长设置为 0.1 ms,起始时间为 0 s,终止时间为 20 ms。在耦合过程中存在着强非线性,求解器选择非线性求解器。在工作过程中存在着明显的内部耦合效应,故进行强耦合求解。本研究以内三角形尾鳍振子为例,其流量仿真如图 6 所示。

由图可知:内三角形尾鳍振子优化前压电泵的

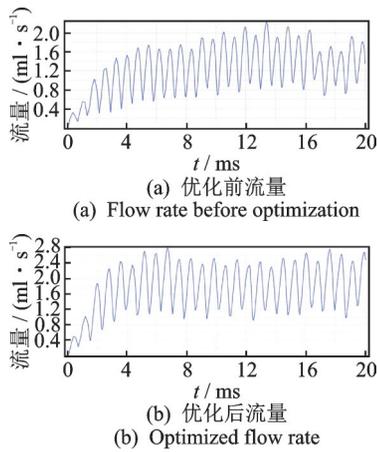


图6 内三角形振子的流量仿真

Fig.6 Flow simulation of inner triangular vibrator

泵送流量收敛于84 ml/min,而优化后压电泵的泵送流量为120 ml/min,优化后的泵送流量约提高了43%;弯月形振子优化前后的泵流量分别为150 ml/min和180 ml/min,泵送能力提升了20%;扇形振子优化前后的泵流量分别为330 ml/min和240 ml/min,不增反降,没有达到预期的优化效果,但其流量在4种振子中最大;三角形尾鳍振子优化前后压电泵的泵送流量分别为96 ml/min和180 ml/min,优化后的泵送流量约提高了87%,优化效果较好。

## 4 实验研究

为了考察不同尾鳍形状的泵送能力,搭建了无阀压电泵流量实验平台,如图7所示。主要包括波形发生器、水源、压电泵、流量计、烧杯、升降台和功率放大器。通过调整升降台以保证泵的出入口的水位平衡,排除液位差对流量的影响。



1-波形发生器; 2-水源; 3-压电泵; 4-流量计感测头; 5-烧杯; 6-流量计控制器; 7-升降台; 8-功率放大器

图7 无阀压电泵流量实验平台

Fig.7 Valveless piezoelectric pump test platform

不同尾鳍优化前后的实验流量如图8所示。由图可知,4种形状振子的流量都呈现出随频率先增加而后减少的趋势。优化前后最佳工作频率的变化规律如下:内凹型(内三角形和弯月形)尾鳍优化后的频率变小,而外凸型(扇形和梯形)频率变大。在

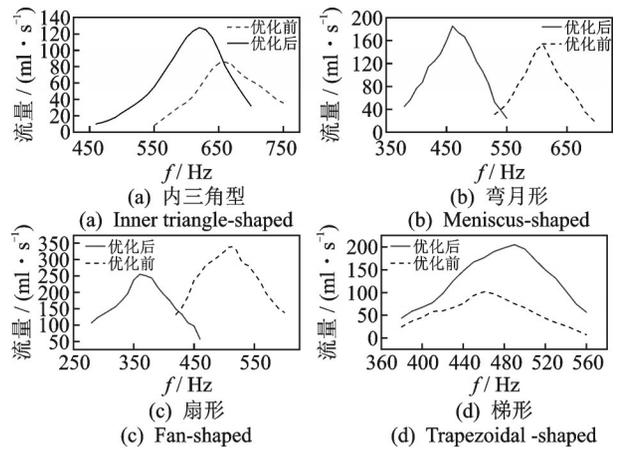


图8 不同尾鳍优化前后的实验流量

Fig.8 Experimental flow rate before and after caudal fin optimization

泵送性能方面,内三角形、弯月形及梯形等3种形状的振子优化后性能上升,分别增加了48.7%,20.6%和101.5%,而扇形振子则下降了一21.2%。从4种振子的横向对比来看,不管是模拟流量还是实际流量,都是扇形尾鳍振子的流量最大,这将为后续的设计提供理论依据。

## 5 结束语

受到鱼类生物尾鳍形状多样性的启发,以褐梅鲷、金枪鱼、斜带石斑鱼及黄金吊等4种鱼类作为参考,提出了内三角形、弯月形、扇形和梯形4种尾鳍形状振子,并对其泵送性能进行了研究。在ANSYS软件平台上分别进行了谐响应、参数灵敏度和优化性能的分析,其中内三角形尾鳍振子的端部振幅提高最大,为233%;扇形尾鳍提升幅度最小,为78%。基于COMSOL多场耦合模块,模拟了振子的泵送流量,其中扇形尾鳍振子的泵送流量最大,为330 ml/min;内三角形的模拟流量最小,为84 ml/min。搭建了流量测试系统,测试结果表明,优化后的内三角形、弯月形及三角形尾鳍振子的实测流量都大幅增加,而扇形尾鳍振子的流量则有所减小。4种形状的尾鳍中,扇形振子的泵送能力最强,最大实测流量为324.0 ml/min。

## 参 考 文 献

- [1] VATANABE S, CHOI A, DE-LIMA C R, et al. Design and characterization of a Biomimetic piezoelectric pump inspired on group fish swimming effect[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(2): 133-147.

- [2] HALES A, JIANG X. Geometric optimisation of piezoelectric fan arrays for low energy cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 52-63.
- [3] 孙夫纯, 胡彩旗, 李胜多, 等. 滴灌压电泵的驱动电源设计与试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(9): 761-766.  
SUN Fuchun, HU Caiqi, LI Shengduo, et al. Design and experiment on driving power supply for drip irrigation piezoelectric pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9): 761-766. (in Chinese)
- [4] 田鹏, 黄俊, 施卫东. 非对称分叉流管无阀压电泵的设计及试验[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1178-1183.  
TIAN Peng, HUANG Jun, SHI Weidong. Design and experimental study of valveless piezoelectric pump with asymmetrical bifurcated channels[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1178-1183. (in Chinese)
- [5] DE-LIMA C R, VATANABE S L, CHOI A, et al. A biomimetic piezoelectric pump: computational and experimental characterization[J]. Sensors and Actuators, A:Physical, 2009, 152(1): 110-118.
- [6] 唐茗, 包启波, 张建辉, 等. 流线形流管无阀压电泵的仿真与实验[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 56-61.  
TANG Ming, BAO Qibo, ZHANG Jianhui, et al. Simulation and experiment of streamlined flow tube valveless piezoelectric pump[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 56-61. (in Chinese)
- [7] PIRESA R E F, KOGAB A A, NAKASONEB P H, et al. Study of oscillatory piezoelectric flow pumps using bimorph actuators with different tip geometries [C]// SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. San Diego: SPIE, 2008: 69300V.
- [8] PIRES R F, VATANABE S L, DE-OLIVEIRA A R, et al. Water cooling system using a piezoelectrically actuated flow pump for a medical headlight system[C]// SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. San Diego: SPIE, 2007: 65270P.
- [9] 胡笑奇, 黄俊, 黄毅, 等. 无阀压电叠堆泵: 中国, CN201010175866.8[P]. 2010-05-18.
- [10] 陈文华. 压电纤维驱动型摆动式压电泵的设计及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [11] HU C Q, HU X Q, JI J, et al. Dynamics analysis on piezoelectric laminated vibrator and optimization of PZT position[J]. Shock and Vibration, 2016, 2016: 8403829.
- [12] HU X, HU C, DU H, et al. Modeling and dynamics analysis on pseudo-rigid-body for the swing vibrator of the caudal-fin-like valve-less pump[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2022, 27(3): 191-198.
- [13] 程健宇, 庄礼贤, 童秉纲. 新月形尾鳍推进的流体力学分析[J]. 力学学报, 1992(4): 458-465.  
CHENG Jianyu, ZHUANG Lixian, TONG Binggang. Hydromechanical analysis of Lunate-tail swimming propulsion[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1992(4): 458-465. (in Chinese)
- [14] 王田苗, 梁建宏. 基于理想推进器理论的尾鳍推力与效率估算[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 18-23.  
WANG Tianmiao, LIANG Jianhong. Computational method of the propulsive force and efficiency of tail-fin propulsion based on ideal propeller theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 18-23. (in Chinese)
- [15] 王田苗, 马文凯, 梁建宏. 仿生机器鱼尾鳍拍动的控制算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1157-1162.  
WANG Tianmiao, MA Wenkai, LIANG Jianhong. Control of tail fin flapping of robofish[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1157-1162. (in Chinese)
- [16] 张曦, 苏玉民, 王兆立. 尾鳍形状对摆动尾鳍推进性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(2): 296-300.  
ZHANG Xi, SU Yumin, WANG Zhaoli. The effects of caudal fin shape on the propulsion performance of flapping caudal fin[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(2): 296-300. (in Chinese)



**第一作者简介:**胡笑奇,男,1969年12月生,博士、副教授。主要研究方向为压电泵的开发和应用。曾发表《Modeling and dynamics analysis on pseudo-rigid-body for the swing vibrator of the caudal-fin-like valve-less pump》(《International Journal of Acoustics and Vibration》2022, Vol.27, No.3)等论文。

E-mail: huxiaoqi163@163.com

**通信作者简介:**胡彩旗,女,1974年11月生,博士、教授。主要研究方向为压电执行器振动分析与控制。

E-mail: hucaiqi@163.com