

文章编号 1004-924X(2025)08-1202-10

翼型挡体无阀压电泵在不同攻角下的输出性能

邝 铭¹, 熊 健¹, 王 璐², 黄亚冬¹, 黄 俊^{1*}, 张思尧³

(1. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013;

2. 华能甘肃能源开发有限公司 范坪分公司, 甘肃 兰州 730070;

3. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:本研究旨在探究翼型攻角变化对翼型挡体无阀压电泵输出性能的影响。通过将对称型和非对称型翼型置于流管内,设计了不同攻角(0°, 5°, 10°和15°)的翼型挡体无阀压电泵,并进行了输出流量和背压的试验测试。同时,利用COM-SOL软件对含翼型挡体的流管进行了内流场模拟仿真,分析了涡旋结构和能量耗散特性。试验结果表明,美国国家航空咨询委员会(National Advisory Committee for Aeronautics, NACA)0015型翼型挡体无阀压电泵在攻角为0°时输出性能最佳,最大流量达到235.56 ml/min,最大背压为842.8 Pa。随着攻角的增大,压电泵的输出性能逐渐降低。流场仿真结果显示,流体反向流过翼型时,流场涡旋尺度大于正向流动时的涡旋,且NACA63-412翼型周围的涡旋更为密集且尺度更大。随着攻角的增大,流场的涡流结构呈现聚集、增多的趋势,涡流强度也随之增大,导致能量耗散加剧。研究表明,翼型攻角对压电泵的输出性能有显著影响,攻角增大会加剧流场能量耗散,从而降低泵的输出性能。本研究为高性能无阀压电泵的设计和优化提供了新的思路 and 理论依据。

关键词:压电泵;翼型挡体;能量耗散;涡识别

中图分类号:TH38 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253308.1202

CSTR:32169.14.OPE.20253308.1202

Output performance of valveless piezoelectric pumps with airfoil baffles at various angles of attack

KUANG Ming¹, XIONG Jian¹, WANG Lu², HUANG Yadong¹, HUANG Jun^{1*}, ZHANG Siyao³

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Fanping Branch, Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou 730070, China;

3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

* Corresponding author, E-mail: huangjun@ujs.edu.cn

Abstract: This study explored the effect of varying the angle of attack of airfoil on the output performance of the valveless piezoelectric pump. It placed symmetrical and asymmetrical airfoils in the tube respectively, and designed valveless piezoelectric pumps with airfoil baffles at various angles of attack (0°, 5°, 10° and 15°). Output performance tests were conducted on the piezoelectric pump. Additionally, flow field simulations using COMSOL software were performed to analyze the vortex structures and energy dissipation

收稿日期:2025-01-20;修订日期:2025-02-10.

基金项目:国家自然科学基金(No. 51605200, No. 52206045)

characteristics. The experimental results showed that the National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 0015 piezoelectric pump performs optimally at a 0° angle of attack, achieving a maximum flow rate of 235.56 ml/min. Under the same angle of attack, the performance of the piezoelectric pump with symmetrical airfoil baffles was better than that of the piezoelectric pump with asymmetrical airfoil baffles. As the angle of attack increased, the piezoelectric pump performance decreased. The simulation results indicated that the scale of the vortices around the airfoil baffle during the reverse flow was higher than that during the positive flow; under the same angle of attack, the vortices around the NACA63-412 airfoil were significantly denser and larger than those around the NACA0015 airfoil. Increasing the angle of attack led to vortex aggregation and intensity rise, accompanied by escalated energy dissipation. The study concludes that the angle of attack significantly affects the pump's performance, with larger angles exacerbating energy dissipation and reducing output. This research provides new insights and theoretical foundations for the design and optimization of high-performance valveless piezoelectric pumps.

Key words: piezoelectric pump; airfoil baffle; energy dissipation; vortex identification

1 引 言

以压电材料为驱动源的压电作动器具有响应迅速、能量密度高、无电磁干扰和易于微小化的特点,在生物医疗、电子散热以及微型机器人等领域具有广泛应用前景^[1-8]。作为压电作动器中的一个分支,压电泵常用于微流体传输领域。按内部有无活动阀门,压电泵可分为有阀压电泵和无阀压电泵^[9-18]。有阀压电泵因内含单向截止阀,展现出优越的输出性能,具有高流量和高扬程等特点,但加工难度大、结构较复杂。而无阀压电泵则结构简单、易加工,但输出回流大、性能相对较差。

为提高无阀压电泵的输出性能,研究人员针对无阀压电泵的流道和泵腔结构设计展开了诸多研究。同时,流道结构的多样化,也使无阀压电泵可满足不同应用场合的需求。Xia等人^[19]提出将不对称斜面挡体置于压电泵的泵腔底部,减小了无阀压电泵的体积,并使该泵在传输流体的时候具有混合的功能。Lee等人^[20]则将不对称的锥形挡体分布在流道中,设计了不对称挡体无阀压电泵,并利用MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)工艺进行了样机制作,含有挡体结构的流道增强了流体混合效果。Packirisamy等人^[21]通过优化渐缩管的几何参数来调整其几何形状,从而提高锥形流管无阀压电泵的输出性能。Huang等人^[22]利用涡流管作为无阀压电泵的不活动阀门,设计了涡旋流管无阀压电泵,当

驱动电压为200 V时,该泵的最大输出流量可达9.86 g/min。He等人^[23]则将带有圆角导流结构的梯形挡体置于泵腔内,设计了圆顶复合结构无阀压电泵,试验结果表明,驱动电压为190 V时,该泵的最大输出流量可达220.6 ml/min。Hu等人^[24]将倾斜挡板置于泵腔内部,开发了内凹三角结构无阀压电泵,驱动电压为180 V时,泵的最大输出流量为190.86 ml/min。

在对无阀压电泵的流道和泵腔结构进行研究的同时,研究人员也利用数值计算方法分析了无阀压电泵内部流场的速度、压力分布及流管压力损失系数。Sen等人^[25]对锥形流管无阀压电泵进行了流固耦合模拟,分析了泵内流场的流动特性及压电振子的振动特性,并根据仿真结果对压电泵进行了结构优化。Zhang等人^[26]对双曲线型流管进行流场模拟,计算了该流管的流阻系数,并提出了一种双曲线型流管的无阀压电泵,该泵的输出流量达到121 ml/min。采用熵产理论可直观有效且定量的确定流场内能量耗散的具体位置和分布^[27, 28],因此Huang等人^[29]利用熵产方法对无阀压电泵的流管进行能量损失分析,并根据计算结果优化了泵的结构,试验结果表明,优化后的压电泵输出性能明显优于优化前的。

翼型因其独特的几何形状和空气动力学特性,在流体中能诱导特定的涡旋结构。将翼型结构置于流管内,可使管内流体在正向与反向流动时产生阻力差异。因此,为了进一步提高无阀压电泵的输出流量,本研究团队将翼型结构引入压

电泵内,设计了一种翼型挡体无阀压电泵并通过数值计算分析了管内翼型结构诱导涡流场的能量耗散特性^[30]。结果表明,该泵的输出性能优于现有其他挡体类型的无阀压电泵。然而,上述研究仅探讨了翼型挡体攻角为 0° 时压电泵的输出性能。但加工误差、装配偏差或动态工况等,都会使翼型攻角发生变化,进而导致管内流体正反向流动时能量耗散比值的差异,从而影响压电泵的输出性能。

为了揭示翼型攻角对压电泵性能的影响机制,量化攻角变化与管内流场能量耗散间关系,并确定合理的容差范围,本研究分别将美国国家航空咨询委员会(National Advisory Committee for Aeronautics, NACA)开发的对称翼型 NACA0015 和非对称翼型 NACA63-412 置于流管内,设计了不同攻角的翼型挡体无阀压电泵,试验研究不同攻角的翼型挡体无阀压电泵输出性能。随后对含翼型挡体流管进行流场模拟,对比分析不同攻角下管内涡流场的变化特性,并结合试验结果,研究两种翼型结构的攻角变化对管内流场能量耗散的影响规律。本研究旨在为高性能压电泵的设计和 optimization 提供新的思路。

2 工作原理及样机制作

图1所示为流体正向和反向流过 0° 攻角翼型时流场示意图。流体沿翼型前缘向尾缘流动时,产生的逆压梯度较小,不会出现边界层分离现象,仅在尾缘处因突扩导致的分离,此时流动阻力较小(正向流动)。流体沿翼型尾缘向前缘流动时,流体流过翼型表面最高点后会产生边界层分离,形成低压区,其后部扰动将十分剧烈,此时流动阻力较大(反向流动)。因此,流体正向和反向流过翼型挡体时,由于不同的能量损失,会导致流动阻力系数不等,使得翼型具有单向截止性能。不同类型的翼型及其不同攻角会导致能量损失和流动阻力系数发生变化。

图2所示为翼型挡体无阀压电泵的工作原理示意图。压电振子受交变电压激励产生法向振动,引起泵腔的容积变化。当泵腔容积增大时,腔内压力低于外部压力,流体经进口和出口管流入泵腔,该阶段为压电泵的吸入过程;当泵腔容

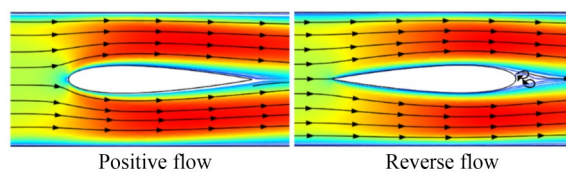


图1 流线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the flow line

积减小时,腔内压力高于外部压力,流体经进口和出口管流出泵腔,该阶段为压电泵的泵送过程。由于翼型挡体的双向流动阻力不等,因此随着压电振子的振动,翼型挡体无阀压电泵可实现流体的单向输运。

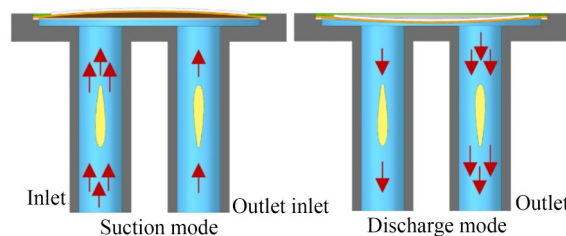


图2 工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle

当压电振子的支撑及驱动条件确定时,翼型挡体的正反向流动阻力将影响压电泵的输出性能。

含翼型流管的压力损失系数(流阻系数)为:

$$\xi = \frac{\Delta p}{\rho v^2 / 2}, \quad (1)$$

其中: Δp 为流体通过含翼型挡体流管时进出口压差, ρ 为流体密度, v 为流管出口的平均流速,则流管的出口流量可表示为:

$$q = A \left(\frac{2}{\rho} \right)^{1/2} \left(\frac{\Delta p}{\xi} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中, A 为含翼型挡体的流管出口处横截面积。

由文献[31]可知,翼型挡体无阀压电泵的输出流量可表示为:

$$V_0 = 2\Delta V f \left[\frac{(\eta_{nd})^{1/2} - 1}{(\eta_{nd})^{1/2} + 1} \right], \quad (3)$$

$$\eta_{nd} = \frac{\xi_b}{\xi_a}, \quad (4)$$

其中: f 为压电振子的驱动频率, ΔV 为振子运

动至最高位置时泵腔的体积变化量, η_{nd} 为流管的正反向流阻系数的比值即阻抗比, ξ_a 为流管的正向流阻系数, ξ_b 为反向流阻系数。由方程 (3) 和方程 (4) 可知, $\xi_a \neq \xi_b$, 无阀压电泵可进行流体的单向输运, 二者差值越大, 输出流量越大。

随着翼型攻角的变化, 流管内流场结构随之变化。因此, 流体正反向流过翼型时的能量耗散及流阻系数也发生改变, 从而影响翼型挡体无阀压电泵的输出性能。为此, 以对称翼型 NACA0015 (“00”表示没有弯度, “15”表示其最大厚度为弦长的 15%) 和非对称翼型 NACA63-412 (“63”表示最大厚度位置相对弦长的位置, “4”表示设计升力系数为 0.4, “12”即此翼型最大厚度约占弦长的 12%) 作为挡体, 并选取翼型弦线与流管轴线的夹角成 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 和 15° 为翼型攻角, 设计了不同攻角的翼型挡体无阀压电泵。采用立体光固化成型技术, 将翼型挡体与进出口流道内壁进行一体成型加工, 制作了翼型挡体无阀压电泵的泵体和流管。图 3 所示为翼型挡体无阀压电泵的装配示意图。该泵由含有翼型挡体的进出口流管、泵体、盖板和压电振子组成, 具体结构参数如表 1 所示。

表 1 结构设计参数
Tab. 1 Structural design parameters of the valveless piezoelectric pumps with airfoil baffles

Parameters	Value/mm
Pump chamber diameter	40
Pump chamber depth	4
Vibrator diameter	45
Vibrator thickness	0.25
Chord length of airfoil	10
Length of the flow tube ahead of the airfoil	10
Length of the flow tube behind the airfoil	10
Inner diameter of tube	8
Outside diameter of tube	12
Length of the flow tube	30

3 试验装置

翼型挡体无阀压电泵的输出性能试验主要为输出流量试验和输出背压试验, 试验示意图如图 4 所示。由信号发生器 (AFG1022, Tektronix, USA) 和功率放大器 (HVP-2070B, NJFN, China) 输出 100 V 的驱动电压激励压电振子, 调节驱动频率并利用分析天平 (精度 0.001 g) 称量该无阀压电泵在单位时间内输出液体的质量, 从而获得翼型挡体无阀压电泵在零背压下输出流量随

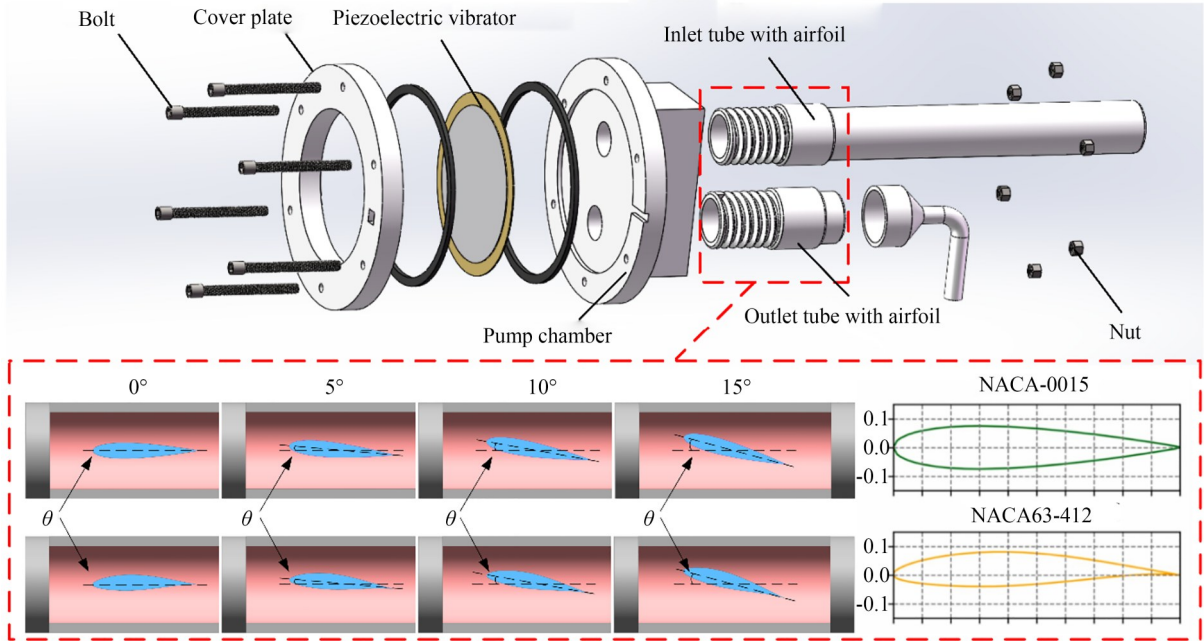


图 3 翼型挡体无阀压电泵的装配示意图
Fig. 3 Assembly diagram of the valveless piezoelectric pump with airfoil baffles

频率变化的关系曲线。随后,在压电泵出口处连接直管,记录不同驱动频率下进出口液面的高度差,从而获得零流量下翼型挡体无阀压电泵的输出背压随频率变化的关系曲线。试验时均采用去离子水作为工作介质。

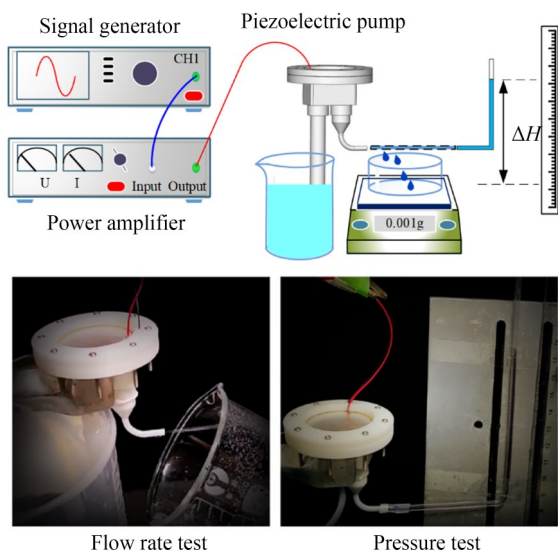


图4 输出性能试验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of output performance experiment

4 流场仿真

对 NACA0015 和 NACA63-412 翼型分别选取 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 和 15° 攻角,建立 8 种含翼型的流管模型。利用软件 COMSOL 对流管的流场计算域进行瞬态数值计算。计算域壁面无速度滑移,进口边界设为试验测得最大流速 0.067 m/s ,出口为压力边界 0 Pa ;流体介质为液态水,密度 1000 kg/m^3 ,动力黏度 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,数值收敛残差设置为 10^{-5} 。采用 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)算法对速度和压力进行耦合求解。

本研究采用正则化螺旋度对管内流场的计算结果进行涡识别,描述旋涡形态以及变化规律。正则化螺旋度 H_n 定义为速度与涡量的点积除以速度的模与涡量的模的乘积:

$$H_n = \frac{\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\omega}}{|\mathbf{v}| |\boldsymbol{\omega}|}, \quad (5)$$

其中: H_n 为正则化螺旋度,其值在 $[-1, 1]$; $\mathbf{v}$ 为速

度矢量; $\boldsymbol{\omega}$ 为涡量矢量。在涡核区域,速度矢量方向与涡量矢量方向近于平行,正则化螺旋度 H_n 趋于 ± 1 。正则化螺旋度 H_n 的符号表明涡旋转的方向,以流动方向为正方向,若 H_n 为正,则涡旋转方向为逆时针方向;若 H_n 为负,则涡旋转方向为顺时针方向^[32]。

由于不同结构和攻角的翼型挡体会影响管内流场的涡结构强度及空间分布从而产生不同的能量损失。根据参考文献[33],因涡旋产生的能量耗散函数为:

$$\Phi = \frac{1}{2} \mu \left[-\frac{2}{3} \Theta \delta_{ij} + 2e_{ij} \right]^2 + \zeta \Theta^2, \quad (6)$$

其中, $\mu, \Theta, \delta_{ij}, \zeta$ 和 e_{ij} , 分别为动力黏度、膨胀度、克罗内克函数、体积粘度系数和应变速率张量。对于不可压缩流体 $\Theta = 0$, 将其代入式(6)得:

$$\Phi = 2\mu (e_{ij} \cdot e_{ij}). \quad (7)$$

总的能量耗散可由下式计算,即为计算域内每个网格体积能量耗散之和:

$$E = \int_V \Phi dV. \quad (8)$$

在计算之前,进行了网格无关性研究,以确保计算精度并最小化计算时间。使用 COMSOL Multiphysics 中的网格生成工具进行网格划分,并在模型的边界处设置了边界层网格,网格的全局尺寸设置为 0.5 mm ,其中平均单元质量达到 0.83 ,偏度小于 0.15 。最终以网格单元数为 160 万、 180 万、 200 万和 220 万进行验证。验证结果如表 2 所示,综合考虑计算时间和计算精度,选取计算域网格单元数约 200 万的网格进行数值计算。

表 2 网格无关性验证结果

Tab. 2 Results of the mesh independence verification

No.	Mesh number	Net output flow ratio
G1	1.6 million	99.897%
G2	1.8 million	99.954%
G3	2.0 million	99.977%
G4	2.2 million	/

5 结果与讨论

图 5(a) 所示为翼型挡体无阀压电泵的流量-

频率曲线。驱动电压为 100 V 时,两种翼型挡体的无阀压电泵输出流量随振子驱动频率的增大均呈现先增大后减小的变化趋势。其中,0°攻角的 NACA0015 型与 NACA63-412 型挡体无阀压电泵的输出流量都在 47 Hz 时达到最大,分别为 235.56 ml/min 和 225.30 ml/min。随着攻角的增大,两种翼型挡体无阀压电泵的最大输出流量均开始降低。除 5°攻角外,NACA0015 型无阀压电泵的最佳输出流量均明显大于相同攻角的 NACA63-412 型无阀压电泵。图 5(b)所示为压电泵的输出背压-频率曲线。驱动电压为 100 V 时,两种翼型挡体无阀压电泵的输出背压随振子驱动频率的增大均呈现先增大后减小的变化趋势。其中,0°攻角的 NACA0015 型与 NACA63-412 型挡体无

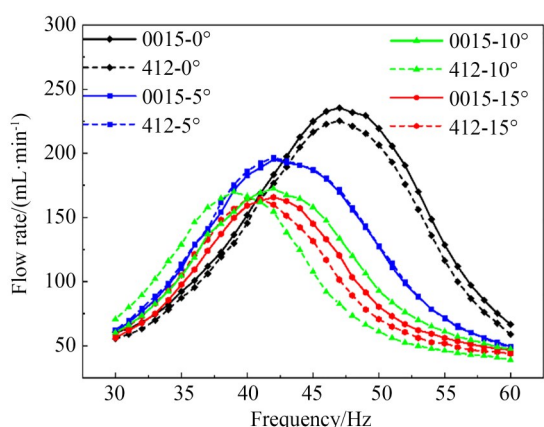
阀压电泵的输出背压都在 35 Hz 时达到最大,分别为 842.8 Pa 和 813.2 Pa。而随着攻角的增大,两种翼型挡体无阀压电泵的最大输出背压也呈降低的趋势。与输出流量试验类似,除 5°攻角外, NACA0015 型无阀压电泵的最佳输出背压均明显大于相同攻角的 NACA63-412 型无阀压电泵。

由此可知,相同攻角下,对称型 NACA0015 型挡体无阀压电泵的输出性能优于 NACA63-412 型无阀压电泵。在翼型攻角为 0°时,两种翼型挡体无阀压电泵均具有最佳输出性能。

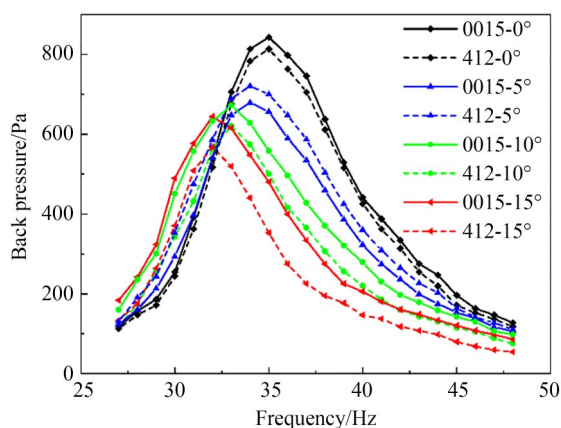
通过对流管内流场的模拟,得到了流体正向和反向流过不同攻角的两种翼型挡体时流场内的涡结构强度及空间分布,如图 6 所示。图 6(a)所示为流体正向流过翼型挡体时的流场涡结构。当流体正向流过管内翼型时,两种翼型挡体的前后缘出现呈左右对称、大小相同、旋向相反的涡系,随翼型攻角的增大,涡流结构均明显呈现聚集、增多的变化趋势,涡流强度也在随之提升。同一攻角下,相对于 NACA0015 翼型,NACA63-412 翼型的涡系总是聚集得更密集,涡系的尺度也更大。图 6(b)所示为流体反向流过翼型挡体时的流场涡结构。当流体反向流过管内翼型趋于稳定时,两种翼型挡体的前后缘出现呈左右对称、大小相同、旋向相反的涡系,且随翼型攻角的增大,涡流结构和正向流动时一样呈现聚集、增多的变化趋势,涡流强度也在随之提升。同一攻角下,NACA63-412 翼型周边的涡系明显比 NACA0015 翼型聚集得更密集,涡系的尺度也更大。同时,反向流动时翼型周边涡系的尺度均高于正向流动时的涡系。

根据流场仿真结果,由方程(1)和方程(4)可得含翼型挡体流管的流阻系数和阻抗比,如表 3 所示。对比两种含翼型挡体流管可知,随翼型挡体攻角的不断增大,流管的正反向流阻系数均不断增大,阻抗比却不断减小,0°攻角下的 NACA0015 翼型流管拥有最高的阻抗比。因此,其单向截止性能最优,压电泵的输出流量最大。除了 5°攻角外,NACA0015 型无阀压电泵的阻抗比均大于相同攻角的 NACA63-412 型无阀压电泵,该结果也与压电泵的输出性能试验结果相吻合。

图 7 所示为管内流场的能量耗散曲线。由图可知,约在 0.25 s 之后管内流场的能量耗散逐渐



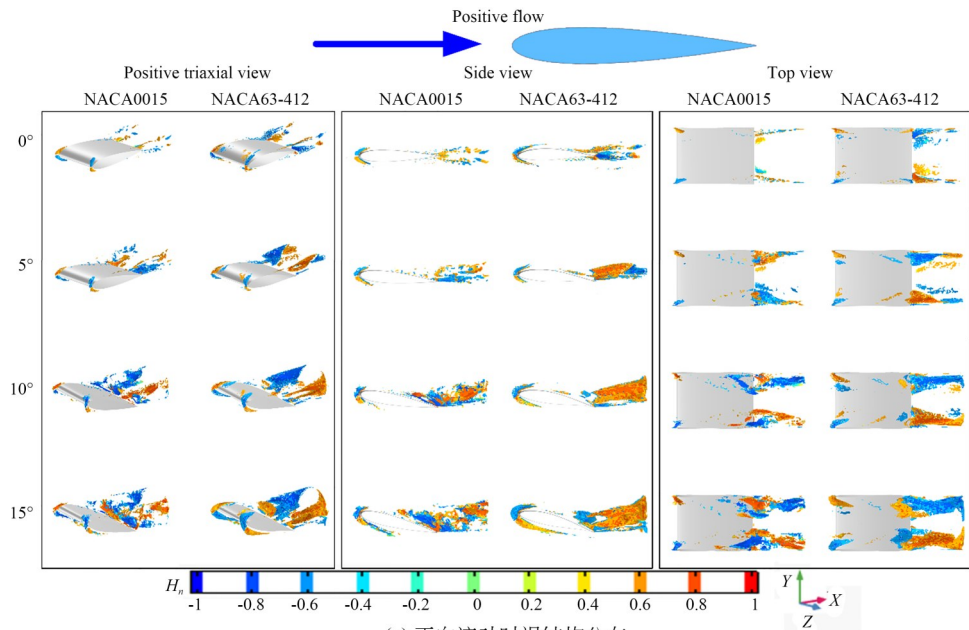
(a) 压电泵的输出流量曲线
(a) Flow curves at varying frequencies



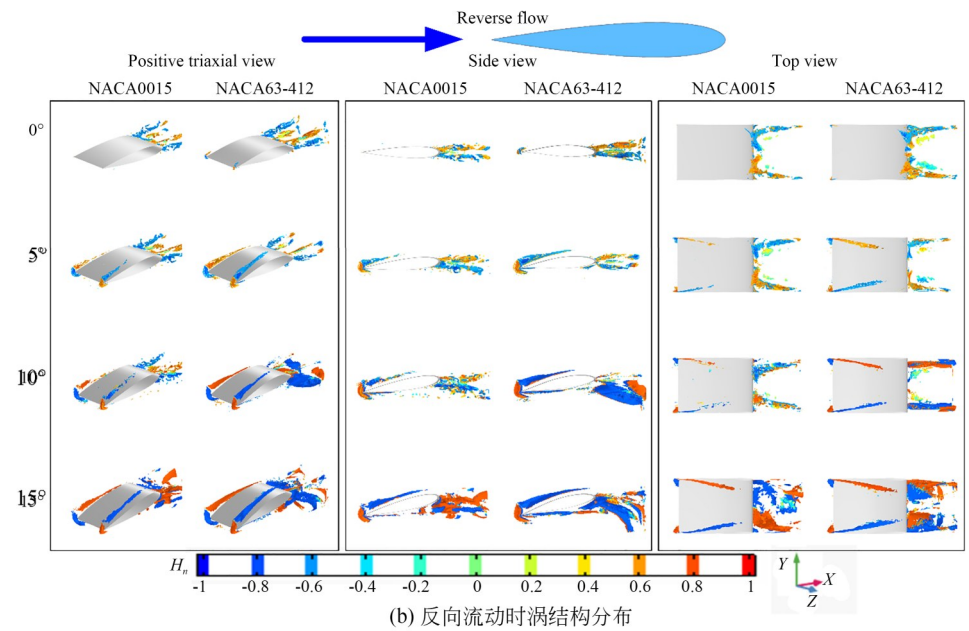
(b) 压电泵的输出背压曲线
(b) Back pressure curves at varying frequencies

图5 压电泵的性能曲线

Fig. 5 Performance curve of the piezoelectric pump



(a) Schematic diagram of vortex structure in positive flow



(b) Schematic diagram of vortex structure in reverse flow

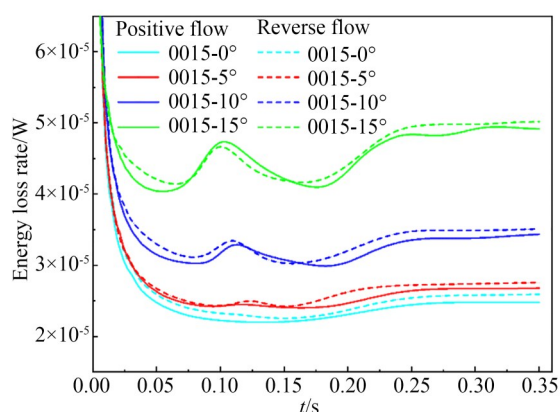
图 6 管内流场涡结构分布

Fig. 6 Distribution of vortex structures within the internal flow field

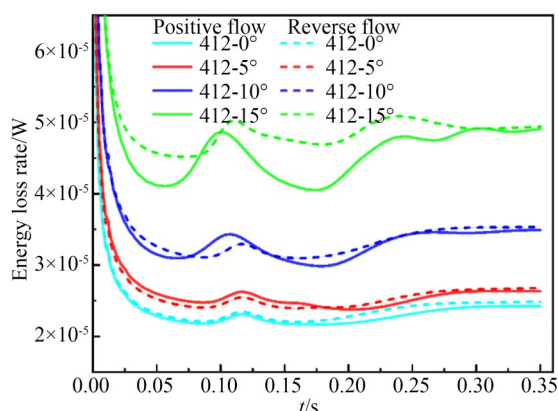
表 3 翼型挡体流管的流阻系数和阻抗比

Tab. 3 Flow resistance coefficient and impedance ratio of tubes with airfoil baffles

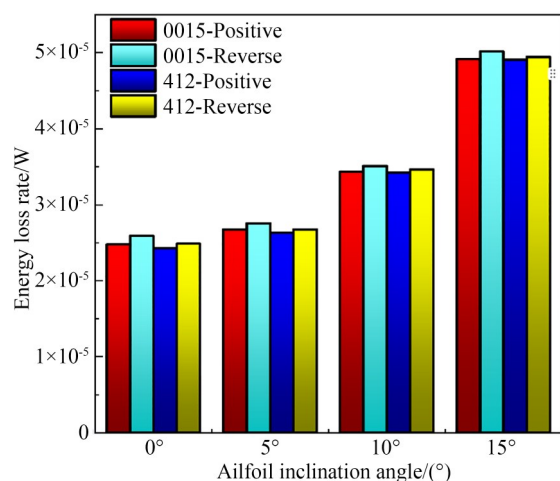
Airfoil		NACA0015				NACA63-412			
Angle		0°	5°	10°	15°	0°	5°	10°	15°
ξ_a		2.476	2.677	3.434	4.916	2.445	2.662	3.475	4.846
ξ_b		2.590	2.760	3.517	4.936	2.545	2.748	3.516	4.865
η_{nd}		1.046	1.030	1.024	1.004	1.041	1.032	1.012	1.003



(a) NACA-0015翼型的能量耗散率曲线
(a) Energy dissipation rate curves of NACA0015 airfoil



(b) NACA63-412翼型的能量耗散率曲线
(b) Energy dissipation rate curve of NACA63-412 airfoil



(c) 两种翼型稳定状态下的能量耗散率
(c) Energy dissipation rates under stable state of two airfoils

图7 两种翼型流管的能量耗散率

Fig. 7 Energy dissipation rates of two airfoils

趋于稳定。随着翼型攻角的增大,流场能量耗散率也不断增大,尤其在 10° 与 15° 攻角下,流场的能量耗散明显高于 0° 与 5° 攻角时。由图7(c)可知,随着翼型攻角的增大,两种含翼型挡体流管的内流场能量耗散率都不断增大,且反向流动的流场能量耗散均高于正向流动时的能量耗散。值得注意的是,含NACA0015翼型挡体流管内正反向流动的能量耗散率之差大于含NACA63-412翼型挡体流管的能量耗散率差值。具体而言,含NACA0015翼型挡板流管具有最大的反向流动能量耗散和最大的能量耗散比,表明了其优越的单向切断性能。结合压电泵的性能试验和流场仿真结果可知,当翼型攻角变化小于 5° 时,压电泵的输出流量下降小于5%,能量耗散率增加不超过8%。此范围内的攻角变化对泵输出性能影响较小,属于可接受的工程容差范围。当翼型攻角大于 10° 时,压电泵的输出流量下降超过58%,能量耗散率增加大于60%。此范围内的攻角变化将显著降低压电泵的输出性能。

6 结 论

为了揭示翼型攻角变化对无阀压电泵性能的影响机制,本文分别将对称型翼型NACA0015和非对称翼型NACA63-412置于流管内,研究了不同攻角的翼型挡体无阀压电泵的输出性能及管内流场特性。试验结果表明,相同攻角下对称翼型(NACA0015)挡体无阀压电泵的输出性能优于非对称翼型(NACA63-412)挡体无阀压电泵。随着攻角的增大,翼型挡体无阀压电泵的输出性能降低。当驱动电压为100 V时, 0° 攻角的翼型挡体无阀压电泵输出性能最佳,最大输出流量为235.56 ml/min,最大输出背压为842.8 Pa。流场仿真结果表明,流体反向流过翼型时翼型周边涡系的尺度均高于正向流动时的涡系;相同攻角下,NACA63-412翼型周边的涡系明显比NACA0015翼型聚集得更为密集,涡系的尺度也更大;围绕NACA63-412翼型的涡系相对于NACA0015翼型更为密集且尺度更广。随着翼型攻角的增大,流场的涡流结构呈现聚集、增多的变化趋势,涡流强度也随之增大。含同一翼型挡体的流管内部反向流动能量耗散率高于正向流动时。此外, 0° 攻角的NACA0015翼型管拥有最高

的阻抗比,其单向截止性能最优。通过量化攻角变化与管内流场能量耗散间的关系,本研究为工程设计提供了明确的容差范围,即当翼型攻角变化在 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 范围内,可确保无阀压电泵的输出性能稳定。本研究成果为翼型挡体无阀压电泵在微电子冷却和微混合等领域中的应用提供了参考,并为高性能无阀压电泵的设计和优化提供了理论依据。

参考文献:

- [1] LIN, FEI P, TOUS C, *et al.* Human-scale navigation of magnetic microrobots in hepatic arteries [J]. *Science Robotics*, 2024, 9(87): eadh8702.
- [2] HUANG J, YANG J L, LI L J, *et al.* The aggregation of micro-particles based on hydraulic vortices [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(3): 032005.
- [3] CHEN S, LIU H D, JI J J, *et al.* An indirect drug delivery device driven by piezoelectric pump [J]. *Smart Material Structures*, 2020, 29(7): 075030.
- [4] 陈松,王淑云,谢心怡,等. 组合式压电驱动芯片水冷系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1140.
CHEN S, WANG S Y, XIE X Y, *et al.* Practical research on computer chip water cooling system with combined piezoelectric pump unit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1140. (in Chinese)
- [5] YANG Z Y, QU M, GLUESENKAMP K R. Ammonia-based chemisorption heat pumps for cold-climate heating applications: a comprehensive review [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115674.
- [6] VELMURUGAN K, SHRIVASTAV A, BHARATH S, *et al.* Evaluating dynamic, fluid flow and performance parameters of piezoelectric based micro-blower: a two-dimensional axisymmetric numerical approach [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, 46(6): 370.
- [7] CHEN S, HUANG Z, CHENG W, *et al.* Design of a piezoelectric pneumatic linear actuator in cell manipulation [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2024, 35(8): 797-808.
- [8] WU Y P, YUAN Q, REN K B, *et al.* Bidirectional energy-controlled piezoelectric shunt damping technology and its vibration attenuation performance [J]. *International Journal of Mechanical System Dynamics*, 2024, 4(1): 63-76.
- [9] PENG T J, GUO Q Q, YANG J, *et al.* A high-

作者贡献声明:

- 邝铭:调查研究、软件、数据管理、初稿写作;
熊健:调查研究、验证、形式分析;
王璐:软件、数据管理;
黄亚冬:软件、可视化呈现、提供资源;
黄俊:论文构思、指导、提供资源、项目管理、审核与编辑写作;
张思尧:验证、可视化呈现。

- flow, self-filling piezoelectric pump driven by hybrid connected multiple chambers with umbrella-shaped valves [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 301: 126961.
- [10] 赵丽清,纪晶. 新型无阀泵机理与试验验证[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12): 2639-2649.
ZHAO L Q, JI J. Principle and experimental verification of valve-less pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(12): 2639-2649. (in Chinese)
 - [11] PAN Q S, LI Y H, DIAO W D, *et al.* Design and investigation of a resonant piezoelectric pump with high output pressure using a displacement-amplifying vibrator [J]. *Smart Material Structures*, 2022, 31(6): 065023.
 - [12] SUN Y M, DENG L Y, WANG L, *et al.* A phase modulation method of sine signal for dual-active-valve piezoelectric pump [J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(8): 086204.
 - [13] ZHANG Y, LI J Y, WANG X L, *et al.* Design and research of a valve-based piezoelectric pump with low forward resistance and high reverse shutoff [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2023, 33(10): 105002.
 - [14] WU G H, JIANG H, LI B. Design of a dual-stage driving circuit for piezoelectric-actuated micropump with bimorph transducer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(16): 16027-16035.
 - [15] YIN Y, ZHOU C, ZHAO F, *et al.* Design and investigation on a novel piezoelectric screw pump [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(8): 085013.
 - [16] 黄俊,朱宜超,施卫东,等. 铍型开槽式阀压电泵的设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(11): 2914.
HUANG J, ZHU Y C, SHI W D, *et al.* Design of cymbal shape slotted valve based piezoelectric pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(11): 2914. (in Chinese)
 - [17] XIE C X, ZHOU S S, ZHANG Y, *et al.* Analy-

- sis of the characteristics of valveless piezoelectric pump with crescent dune bluff body [J]. *Science Progress*, 2023, 106(4): 368504231208503.
- [18] JASIM H F, ISMAEL M A. Thermal and fluid aspects of dual piezoelectric jet pump of double chambers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 244: 122698.
- [19] 夏齐霄, 张建辉, 李洪. 非对称坡面腔底无阀压电泵[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 641-647. XIA Q X, ZHANG J H, LI H. Valve-less piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 641-647. (in Chinese)
- [20] LEE C J, SHEEN H J, TU Z K, *et al.* A study of PZT valveless micropump with asymmetric obstacles [J]. *Microsystem Technologies*, 2009, 15(7): 993-1000.
- [21] CHANDRASEKARAN A, PACKIRISAMY M. Improved efficiency of microdiffuser through geometry tuning for valveless micropumps [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2016, 138(3): 031101.
- [22] HUANG J, ZOU L, TIAN P, *et al.* Development of a valveless piezoelectric pump with vortex diodes [J]. *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, 2019, 29(12): 125006.
- [23] HE L P, ZHAO D, LI W, *et al.* Performance analysis of valveless piezoelectric pump with dome composite structures [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(6): 065002.
- [24] HU D B, HE L P, ZHANG Z, *et al.* Research on a valveless piezoelectric pump with inner concave triangle structure [J]. *Microsystem Technologies*, 2022, 28(8): 1935-1945.
- [25] SINGH S, KUMAR N, GEORGE D, *et al.* Analytical modeling, simulations and experimental studies of a PZT actuated planar valveless PDMS micropump [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 225: 81-94.
- [26] BIAN K, HUANG Z, BAO Q B, *et al.* Design and experiment of streamlined piezoelectric pump with low vortex and large flow rate [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 37(1): 155-163.
- [27] LIU Y, DU J, LI J C, *et al.* A stall diagnosis method based on entropy feature identification in axial compressors [J]. *International Journal of Mechanical System Dynamics*, 2023, 3(1): 73-84.
- [28] PEI J, SHEN J W, WANG W J, *et al.* Evaluating hydraulic dissipation in a reversible mixed-flow pump for micro-pumped hydro storage based on entropy production theory [J]. *Renewable Energy*, 2024, 225: 120271.
- [29] HUANG J, GONG J Q, WANG L, *et al.* Optimal design of fluidic diode for valveless piezoelectric pump based on entropy production theory [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 356: 114342.
- [30] WANG L, YANG J L, AFFANE H, *et al.* A high flow-rate single-chamber valveless piezoelectric pump with airfoil baffles [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 354: 114229.
- [31] STEMME E, STEMME G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1993, 39(2): 159-167.
- [32] GUSTAFSSON B. Vortex motion and geometric function theory: the role of connections [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2019, 377(2158): 20180341.
- [33] 童秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论 [M]. 2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. TONG B G, YIN X Y, ZHU K Q. *Vortex Motion Theory* [M]. 2nd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



邝 铭(2000—),男,江西赣州人,2022年于江苏大学获学士学位。现为江苏大学流体机械工程技术研究中心动力工程专业硕士研究生,研究方向为压电作动器的结构设计与研究。E-mail: 2222211057@stmail. ujs. edu. cn

通讯作者:



黄 俊(1981—),男,安徽芜湖人,博士,副研究员,硕士生导师,2014年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事压电作动器和微型流体机械的研究。E-mail: huangjun@ujs. edu. cn