

无阀压电泵半球缺阻流体横向排列流阻干扰特性研究*

纪 晶^{1,2} 张建辉¹ 陈道根¹ 赵淳生¹

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016;

2. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 为分析阻流体无阀压电泵用半球缺横向排列的流阻特性及对泵输出性能的影响,对泵腔内多个半球缺横向排列的流阻作用规律进行了研究。基于单个半球缺绕流阻力的研究成果,在分析横向排列半球缺的影响因素基础上,通过试验得出了两个半球缺横向排列流阻干扰系数及绕流阻力系数的作用规律;进而推导了多个半球缺横向排列流阻干扰系数及绕流阻力系数的理论计算;通过对4个横向排列半球缺的流阻及泵流量试验,验证了该理论推导用于分析、预测半球缺阻流体无阀压电泵流阻特性和理论流量的可行性。在驱动电压为120 V、驱动频率为6 Hz时,得到了44.78 mL/min的泵流量,理论和试验流量的平均偏差为39.34%。

关键词: 无阀压电泵 半球缺 阻流体 横向排列 特性分析

中图分类号: TH35; TH38 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0340-07

引言

压电泵^[1-10]是利用压电陶瓷的逆压电效应使压电振子变形,产生泵腔的容积变化来完成流体输送的流体机械。无阀压电泵^[3-10]就是利用特殊的无移动部件阀结构,使得正、反流的流体阻力不同来实现流体的单向流动。泵腔内无运动部件,不仅使泵的寿命和可靠性可以得到有效的保证,而且结构简单,有利于MEMS集成。在生物、医疗^[11-13]、化工^[12]、微小机构燃料供给^[14]等领域都拥有巨大的应用潜力;在农作物培植中,现有的水培^[15]及滴灌^[16-17]装置不能满足实验室研究及培育新品种的需要,对阻流体无阀压电泵的研究,旨在推广其在实验室水培、精密滴灌等微量输液系统及节水灌溉技术领域的应用。

半球缺阻流体无阀压电泵^[18]是一种新型的压电泵,其阻流体半球缺是1/4球体。球面和圆面迎流面能够形成稳定的流阻差;同时,半球缺工艺简单,安装调整方便,故该泵具有很好的发展前景。泵腔内半球缺个数及排列方式直接影响着泵的输出性能,而多个半球缺横向排列流阻特性的研究尚未见报道。与半球缺极为相近的多圆球横向排列^[19-21]、多圆柱横向排列^[22-23]的研究也很少。

本文基于前期的研究,对多个半球缺横向排列的绕流阻力作用规律进行探讨,得到两个半球缺横向排列绕流阻力系数的作用规律;进而递推出多个半球缺绕流阻力系数理论计算;通过对并列的4个半球缺流阻试验进一步验证上述理论分析的正确性,并对泵的理论及试验流量进行比较。

1 半球缺阻流体无阀压电泵

1.1 阻流体半球缺结构及流体特性

图1所示为半球缺阻流体无阀压电泵中所用的阻流体半球缺的几何实体结构,是由直径Φ8 mm的钢球经线切割加工而成的四分之一球体,故其特征表面为1/4球面和1/2圆面。图2中均匀来流以流速 v_1 、 v_2 沿左右两个方向同时作用到半球缺的球面和圆面后,具有光滑、圆顺表面的球面对流体的阻力

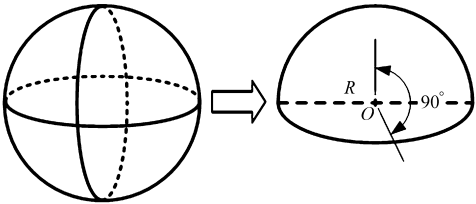


图1 半球缺的实体及几何模型

Fig. 1 Physical and geometric model of the hemisphere-segment

收稿日期: 2013-11-12 修回日期: 2013-12-05

* 国家自然科学基金资助项目(51205193、51375227)、国家自然科学基金重大研究计划项目(91223201)和机械结构力学及控制国家重点实验室基金资助项目(0313G01)

作者简介: 纪晶, 博士生, 青岛农业大学讲师, 主要从事新型压电泵的结构设计及理论研究, E-mail: qnjijing@163.com

通讯作者: 张建辉, 教授, 博士生导师, 主要从事压电驱动技术、压电流体执行器研究, E-mail: zhangjh@nuaa.edu.cn

较小,其绕流阻力系数 C_{Dzh} 也较小;具有陡直端面的圆面对流体的阻力较大,其相应的绕流阻力系数 C_{Df} 也较大。半球缺阻流体无阀压电泵正是巧妙地利用了半球缺所具有的不同几何形状的迎流面对流体产生的阻力不同,形成了沿正、反两方向的流动阻力差,从而起到了泵送流体的功能。

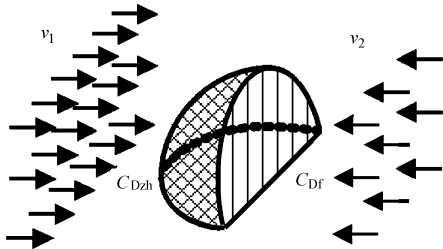


图2 半球缺正、反迎流面阻力特性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flow resistance property on forward and reverse flow-facing surface of hemisphere-segment

1.2 半球缺阻流体无阀压电泵工作过程

图3为半球缺阻流体无阀压电泵结构图。该泵主要由泵腔、泵座、双晶片压电振子、半球缺及密封圈组成。半球缺的两个迎流表面——1/4球面和1/2圆面正对着的管口,分别定义为泵的入口和出口,流体由入口流入、经出口排出的流动则定义为正向流动;流体由出口流入、由入口排出的流动则定义为反向流动。

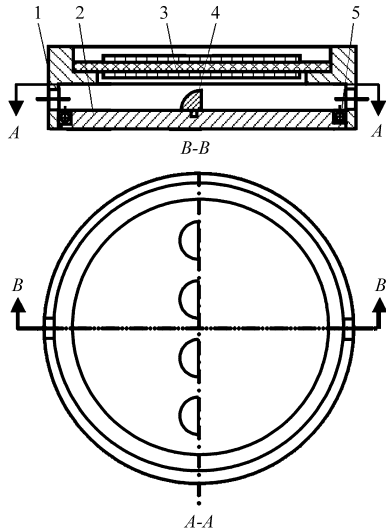


图3 半球缺阻流体无阀压电泵结构简图

Fig. 3 Structure diagram of the valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body

1. 泵腔 2. 泵座 3. 压电振子 4. 半球缺 5. O形密封圈

由于压电振子往复振动,压电泵的一个工作周期可分成4个阶段,如图4所示。图中,设振子由水平位置向上振动到最大位移处为第1工作阶段;由最大位移处向下振动到水平位置处为第2工作阶段,由水平位置向下振动到反方向最大位移处为第

3工作阶段;由反方向最大位移处振动到水平位置为第4工作阶段。其中由第1和第4工作阶段完成泵内流体的吸入过程;由第2和第3工作阶段完成泵内流体的排出过程,振子这样往复振动,就形成了泵的往复吸、排过程。

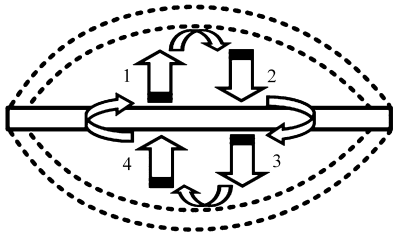


图4 压电振子工作周期示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the piezoelectric vibrator work cycle

2 单个半球缺绕流阻力分析

S_1 、 S_2 分别为半球缺的1/4球面和1/2圆面迎流面面积, Re_{p1} 、 Re_{p2} 分别为由等效流阻直径 d_1 、 d_2 定义的雷诺数。绕流阻力系数随着球面面积 S_1 和圆面面积 S_2 的增大,其对流体的阻碍均呈正比例趋势变化,等效流阻雷诺数 Re_{p1} 、 Re_{p2} 对绕流阻力的影响规律同圆球绕流的作用规律一致,即随着 Re_{p1} 、 Re_{p2} 的增加,绕流阻力呈幂指数规律变化,于是,单个半球缺的正、反向绕流阻力系数关系式为

$$C_{Dzh1} = aS_1 Re_{p1}^b = 1.955 Re_{p1}^{-0.494} = \frac{1.955}{Re_{p1}^{0.494}} \tag{1}$$

$$C_{Df1} = cS_2 Re_{p2}^d = 1.351 Re_{p2}^{-0.381} = \frac{1.351}{Re_{p2}^{0.381}} \tag{2}$$

式中 a 、 b 、 c 、 d ——待定参数

式(1)、(2)即为半球缺正、反向绕流阻力系数理论计算式。

图5是单个半球缺的正、反向绕流阻力系数随雷诺数的变化曲线,在低雷诺数 ($Re_p < 4\,000$) 范围内,半球缺的正、反向绕流阻力系数随雷诺数的增加而减小,且反向绕流阻力系数远大于正向绕流系数,为无阀泵的成因提供了理论支持^[24]。

3 两个半球缺横向排列流阻干扰特性

3.1 横向流阻干扰系数 β_H 影响因素分析

半球缺沿垂直流向横向排列是无阀压电泵泵腔内半球缺的基本排列方式之一,研究其流体阻力特性是分析和研究无阀压电泵泵送性能的基础。对于横向排列的两个半球缺,当间距 S_H 较小时,半球缺间的流体相互干扰强烈,形成复杂的流动现象,涉及到流动的分离、旋涡的生成和脱落、旋涡之间的相互干扰等复杂的流动问题,流态十分紊乱,导致绕流阻

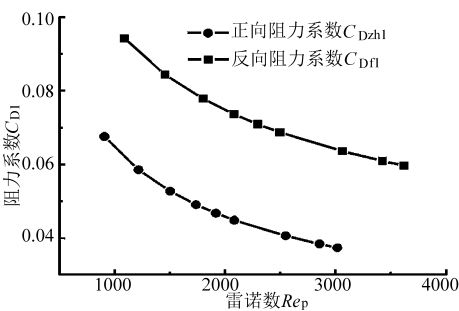


图5 单个半球缺的正、反向绕流阻力系数曲线
Fig.5 Curves of forward and reverse flow resistance coefficient for one hemisphere-segment

力产生复杂的变化。两半球缺横向流阻干扰系数定义为:两半球缺的平均阻力系数 $\bar{C}_D$ 与单个半球缺绕流阻力系数 C_{D1} 之比($\beta_H = \bar{C}_D/C_{D1}$)。为研究两半球缺横向排列时其绕流阻力随两半球缺间距变化的规律,有必要先对横向排列半球缺的流阻干扰系数 β_H 的影响因素进行分析。对于确定的泵样机结构及半球缺形体,其横向排列流体阻力特性仅与流速、雷诺数及间距比的变化有关。现对流速及雷诺数的影响进行试验分析。被测半球缺所在圆球直径 $\Phi 8\text{ mm}$,水流平均流速分别取为 0.522 0 m/s 、 0.393 3 m/s ,淹深为 4.5 mm ,同尺寸2个半球缺垂直流向横向排列的间距比取为 $S_H/R = 3.0$,分别以单个半球缺及两个半球缺横向排列在两种流速下进行流阻测试,以正向流动为例,其试验数据如表1所示。

表1 速度及雷诺数对横向排列两半球缺流阻干扰系数的影响

Tab.1 Effect of velocity and Reynolds number on the flow resistance interference coefficients of two hemisphere-segments arranging in transverse			
系数		速度 $v/(m\cdot s^{-1})$	
		0.522 0	0.393 3
单个半球缺	雷诺数 Re_p	2 002. 18	1 499. 583
	绕流阻力系数 C_{Dzh1}	0.020 2	0.011 8
	雷诺数 Re_p	1 972. 36	1 486. 40
两个半球缺	总绕流阻力系数 C_{Dzh2}	0.051 3	0.029 8
	平均绕流阻力系数 $\bar{C}_D$	0.025 7	0.014 9
	横向流阻干扰系数 β_H	1. 268 4	1. 263 5

根据表1数据可知,两半球缺在不同流速及雷诺数下,其横向流阻干扰系数 β_H 近似相等,故可得出结论:两半球缺垂直流向横向排列时,其横向流阻干扰系数 β_H 与速度 v 及雷诺数 Re_p 无关。

3.2 两个半球缺横向排列流阻作用规律研究

两半球缺垂直流向横向排列时,两半球缺所受绕流阻力的大小和间距 S_H 与等效球缺直径 d_1 、 d_2 的比值有关。而半球缺过球心的半径 $R = 4\text{ mm}$,表征了半球缺的空间轮廓尺寸,故此半径可作为半球缺的

特征半径使用。为分析和计算方便,间距比可做如下定义:横向间距 S_H 与半球缺特征半径 R 的比值,即 S_H/R 。两半球缺垂直流向横向排列时,两半球缺之间水流被挤压,造成流速变大,同时边界位置发生改变,使得两半球缺之间的流场变得非常复杂,甚至紊乱,从而导致作用于两半球缺上的水动力发生变化,即两半球缺所受绕流阻力之和不再是原两半球缺绕流阻力的简单叠加,而是增大,增大的幅度与两半球缺之间的间距比 S_H/R 密切相关, S_H/R 越小即两半球缺距离越近,绕流阻力增大的幅度越大;反之, S_H/R 越大即两半球缺距离越远,绕流阻力增大的幅度越小,直至两者之间的距离增大到对两半球缺的绕流阻力无影响。

为详细讨论半球缺间距比 S_H/R 的变化对横向流阻干扰系数的作用规律,进行两个半球缺横向变间距排列的流阻试验。试验中半球缺的横向间距比 S_H/R 取2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0、6.0进行测试,并计算出各种间距比下的总绕流阻力系数及横向流阻干扰系数。

图6及图7分别是横向排列时正反向总绕流阻力系数、横向流阻干扰系数与间距比变化的关系曲线。分析图6可知,两半球缺横向排列时,其正、反向总绕流阻力系数 C_{Dzh2} 、 C_{Dh2} 均随间距比 S_H/R 的增加而呈减小的趋势,这与文献[19-20]的变化趋势相近;且其最大绕流阻力系数出现在间距比最小($S_H/R = 2$)处;反向流动时的总绕流阻力系数总是大于正向流动时的总绕流阻力系数;且间距比最大($S_H/R = 6$)处,反向流动时的总绕流阻力系数与正向流动时的差值接近于单个半球缺反向与正向差值的2倍;同时看到,其横向排列的间距比越小,反向与正向流动的流阻差值越大,则越有利于泵送性能的提高。分析图7可知,两半球缺横向排列时,其正、反向流阻干扰系数 β_{Hh} 、 β_{Hr} 均随间距比 S_H/R 的增加而呈减小的趋势,其最大流阻干扰系数出现在最小间距比($S_H/R = 2$)处;当间距比增至最大($S_H/R = 6$)处,其正、反向流阻干扰系数稳定地趋近于1;另外,正、反向流阻干扰系数随间距比变化过程中,其正向流阻干扰系数总是略大于反向流阻干扰系数,直至趋近于定值1。

分析图中数据可知,在间距比较小($S_H/R \approx 2$)时,两个半球缺横向紧密相接,正、反向水流被大面积阻挡,在迎流区域水位涌高,背流面处形成旋涡区,在旋涡区处的压强较低,因此在半球缺前后形成较大的压力差,表现为正、反向流动的总阻力系数达到最大值,同时其横向干扰系数也达到最大值;随着间距比的增大,两个半球缺之间的横向间隙逐渐增加($S_H/R < 6$),水位涌高的程度降低,水流也由之前的急速、拥堵状态逐渐过渡为舒缓、平稳状态,但两

半球缺之间的流体仍然还是互相干扰,此区间的正、反向流动的总阻力系数逐渐降低,同时其横向干扰系数也逐渐减小;当两个半球缺之间的横向间隙增加到 $S_H/R \geq 6$ 时,两半球缺之间的横向间隙较大,其间隙内的流体不再互相干扰,两个半球缺各自恢复到单个半球缺的绕流状态,不再受间距比变化的影响,说明此时绕过两半球缺的流体彼此互不掺混、互不干扰,各自按照绕流单个半球缺的绕流轨迹而流动。此时正、反向流动的平均绕流阻力系数分别减小到各自方向上的单个半球缺的绕流阻力系数并在该值处波动,同时其横向流阻干扰系数减小至 1.0 后趋于稳定。另外,由于球面对流体的阻力小于圆面对流体的阻力,故在整个间距比变化过程中,正向流阻干扰系数总是略大于反向流阻干扰系数。

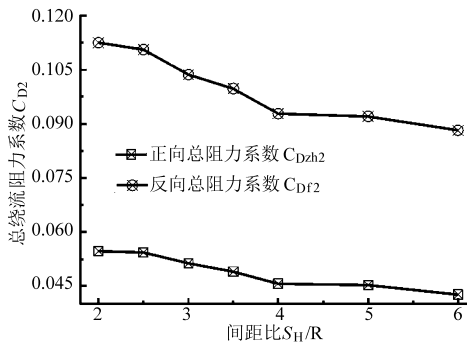


图6 横向排列正、反向总绕流阻力系数随间距比变化曲线

Fig. 6 Change curves of the forward and reverse flow resistance coefficients along with the spacing ratio as the hemisphere-segment in transverse arrangement

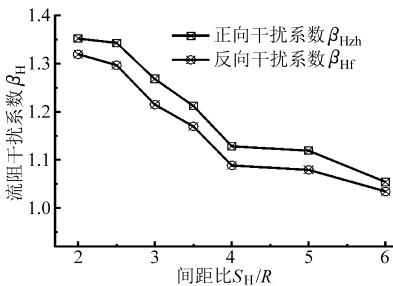


图7 横向排列流阻干扰系数随间距比变化曲线

Fig. 7 Change curves of the forward and reverse flow resistance interference coefficients along with the spacing ratio as the hemisphere-segment in transverse arrangement

根据图 7 中的试验数据,拟合得到变间距下半球缺正、反向横向流阻干扰系数的计算公式

$$\beta_{Hzh} = \begin{cases} 1.518 - 0.036 \frac{H}{R} - 0.026 \left(\frac{H}{R} \right)^2 + \\ 0.003 \left(\frac{H}{R} \right)^3 & \left(2 \leq \frac{H}{R} < 6 \right) \\ 1 & \left(\frac{H}{R} \geq 6 \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta_{Hr} = \begin{cases} 1.570 - 0.107 \frac{H}{R} - 0.01 \left(\frac{H}{R} \right)^2 + \\ 0.002 \left(\frac{H}{R} \right)^3 & \left(2 \leq \frac{H}{R} < 6 \right) \\ 1 & \left(\frac{H}{R} \geq 6 \right) \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)的拟合误差为:正向计算值与试验值的最大相对偏差为 -3.22%,平均绝对偏差为 1.42%;反向计算值与试验值的最大相对偏差为 -2.88%,平均绝对偏差为 1.28%。可见,误差较小,可以利用式(3)、(4)进行横向排列流阻干扰系数的分析和相关计算。

由式(3)、式(4)可知,两半球缺横向变间距排列下,其正、反向总绕流阻力系数计算式为

$$C_{Dzh2} = 2\beta_{Hzh} C_{Dzh1} \quad (5)$$

$$C_{Dr2} = 2\beta_{Hr} C_{Dr1} \quad (6)$$

分析式(5)、式(6)可知,流体沿正向和反向绕流过两个半球缺后,由于两个半球缺之间的流体相互干扰,导致两个半球缺的正、反向总绕流阻力系数随着间距比由大到小的变化呈增加趋势,其增加的最小值约为原单个半球缺阻力系数的 2 倍,故横向排列的两半球缺,其正、反向总绕流阻力系数值是增加的。

4 多个半球缺横向排列流阻特性分析

4.1 多个半球缺横向排列流阻作用规律分析

前面得到了两个半球缺横向排列流阻干扰系数 β_H 与间距比 S_H/R 的计算公式,在等间距比的情况下,多个半球缺横向排列,其引起的水头损失应遵循水头损失叠加原理,相应的绕流阻力系数应遵循阻力系数叠加原理,即 n 个半球缺的总绕流阻力系数应等于所有半球缺的绕流阻力系数之和,故 n 个半球缺垂直流向横向排列时,其正、反向总绕流阻力系数计算公式为

$$C_{Dzhn} = n\beta_{Hzh} C_{Dzh1} \quad (7)$$

$$C_{Drn} = n\beta_{Hr} C_{Dr1} \quad (8)$$

式中 n ——半球缺的排数

将式(1)、(2)代入到式(7)、(8)得到

$$C_{Dzhn} = k_1 n \beta_{Hzh} \frac{1.955}{Re_{p1}^{0.494}} \quad (9)$$

$$C_{Drn} = k_2 n \beta_{Hr} \frac{1.351}{Re_{p2}^{0.381}} \quad (10)$$

式中 k_1, k_2 ——修正系数

因半球缺的流阻测试与温度、湿度、环境等条件有很大关系,为弥补不同测试条件下对绕流阻力系数的影响,特采用 k_1, k_2 对测试值进行修正。 k_1 取值为相同雷诺数下式(1)与当前测试的单个半球缺正

向绕流阻力系数的比值, k_2 取值为相同雷诺数下式(2)与当前测试的单个半球缺反向绕流阻力系数的比值。

式(9)、式(10)即为任意 n 个半球缺横向等间距排列正、反向流动的总绕流阻力系数计算公式。

4.2 流阻试验验证

为验证横向排列总绕流阻力系数计算式的正确性,进行了横向排列4个半球缺的总阻力测试试验,测试中取间距比 $S_H/R = 3.0$,并将测试数据和理论计算数据加以比较,4个半球缺的总绕流阻力系数的试验值与利用式(9)、式(10)得到的计算值非常接近,其正、反向偏差分别为 -3.26% 、 5.07% 。误差较小,可以利用式(9)、(10)进行多个半球缺横向阻力的相关分析和计算。

4.3 泵流量试验与分析

为验证半球缺阻流体无阀压电泵的泵送性能及其上述理论分析的正确性,进行泵流量试验。取半球缺个数分别为1、2、3、4个,半球缺间横向间距比为 $S_H/R = 3.0$,将半球缺固定于泵腔内,试验流体介质为水,驱动电压取 $U = 120\text{ V}$ 。如图8所示,横向排列半球缺的个数 n 及驱动频率 f 的变化对泵流量都有绝对的影响。当泵腔内固定有1个半球缺时,泵最大流量达到了 41.35 mL/min ;当半球缺的个数增加到4个时,泵流量达到了 44.775 mL/min 。可见,半球缺无阀压电泵泵送流体的流量随横向排列半球缺个数的增加而增加。分析原因可知,随着横向排列半球缺个数的增加,流体绕流过全部半球缺后的正、反向流阻差增加,因而导致净流量增加。另外,在谐振频率 $f = 6\text{ Hz}$ 附近,不同数量的半球缺无阀泵都达到了峰值流量,远离谐振频率处,流量降低。分析原因,处于谐振频率处,振子振动幅值最大,故泵腔容积变化量最大,泵送流体的能力最强。

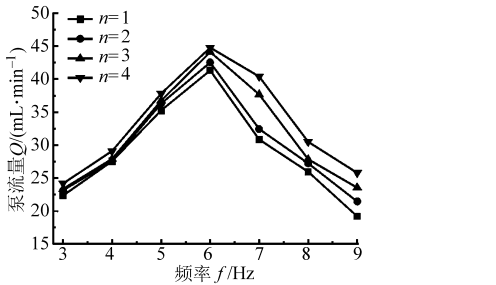


图8 横向排列半球缺个数及频率对泵流量的影响曲线
Fig.8 Curve of the pump's flow rate that relation to the working frequency and the number of the hemisphere-segment that in transverse arrangement

泵理论流量 Q_L 可通过压电振子振动的容积变化量 ΔV 、正反向绕流总阻力系数 C_{Dzhn} 、 C_{Dfn} 及振子的振动频率 f 计算,泵腔容积变化量 $\Delta V^{[25]}$ 的表达

式为
$$\Delta V = 2\pi \int_0^{R_0} w_0 (1 - r^2/R_0^2) r dr = \pi w_0 R_0^2/2 \quad (11)$$

式中 R_0 ——压电振子半径
 w_0 ——压电振子中心点的振动幅值

在压电振子振动频率为 f 的情况下,压电泵一个振动周期内的泵流量可表示为^[24]

$$Q_L = f \Delta V (\zeta_1 - \zeta_2) / [2(1 - \zeta_1 \zeta_2)] \quad (12)$$

其中 $\zeta_1 = [1 - a(1 + C_{Dzhn})]^{1/2} / (1 - a + C_{Dzhn})^{1/2}$
 $\zeta_2 = (1 - a + C_{Dfn})^{1/2} / [1 - a(1 + C_{Dfn})]^{1/2}$
 $a = A_0^2/A^2$

式中 A_0 ——出入口管横截面积
 A ——泵腔中心处横截面积

正、反向流动的总绕流阻力系数计算值 C_{Dzhn} 、 C_{Dfn} 可通过式(9)、式(10)计算得到。振幅值与频率变化有关,本文通过试验测试得到 $f = 6\text{ Hz}$ 时的压电振子中心振动幅值为 $w_0 = 0.1042\text{ mm}$,于是,可计算泵腔体积变化量 ΔV 及1~4半球缺下的泵理论流量 Q_L 。试验测试泵流量取加载电压为 $U = 120\text{ V}$ 、频率 $f = 6\text{ Hz}$ 下1~4半球缺的试验流量 Q_s 。理论流量与试验流量随半球缺个数 n 的变化曲线如图9所示。

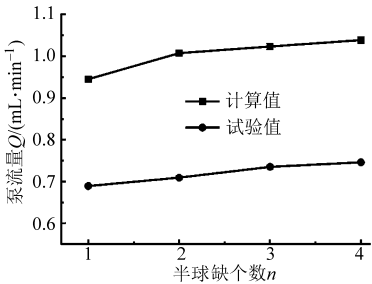


图9 不同横向排列半球缺个数下泵理论及试验流量曲线
Fig.9 Curves of the theory and test flow rate with different numbers of hemisphere-segments in transverse arrangement

分析图9可知,泵理论与试验流量均随半球缺个数的增加而增大;两者的变化趋势保持一致。但理论值与试验值之间存在较大的偏差,最大偏差为 42.0% ,最小偏差为 37.0% ,平均偏差为 39.34% 。产生这个现象的原因为:

(1) 基于流体流场的复杂性,至今在数学上还难以建立工程中实用的流动方程式,而对于各种流动问题的分析,进行模型的移植、简化是目前用的较多的处理方式。文中理论流量导出公式是采用定常流模型建立的,而试验中的流态却是瞬态流,瞬态流流动过程中容易产生激波,而激波的振动、撞击会消耗大量的能量,这些能量不可逆转的转变为热量,使沿程机械能不守恒,直接导致试验流量低于理论流量。

(2) 试验流量测试中,流体绕过多个半球缺后

会产生边界层分离现象,并在分离处产生大量旋涡及涡旋,造成流体能量的损失,使试验流量减小。

(3) 另外,旋涡的迂回、管道弯曲、振颤、气泡、样机的密封、试验环境等因素引起的误差随机出现和无法估量,无法量化到理论或试验中去,因而直接影响理论分析和试验结果计算精度。

5 结论

(1) 基于单个半球缺的正、反向流动的绕流阻

力系数研究成果,分析了横向排列半球缺的影响因素,通过试验研究,建立了两个半球缺正、反向流动的横向流阻干扰系数及绕流阻力系数的计算公式。

(2) 基于水头损失叠加原理,推导了任意多个半球缺横向排列正、反向流动的流阻干扰系数及绕流阻力系数计算。

(3) 通过对4个横向排列半球缺的流阻及泵流量试验,验证了利用该理论推导,分析、预测半球缺陷流体无阀压电泵理论流量的可行性。

参 考 文 献

- 1 孙业明,曾平,程光明,等. 单腔单振子压电泵流量自测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 327-332.
Sun Yeming, Zeng Ping, Cheng Guangming, et al. Flow self-measurement method for single chamber and single vibrator piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 327-332. (in Chinese)
- 2 吴越,杨志刚,刘勇,等. 压电泵泵阀高频振动时不完全关闭特性研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 262-266.
Wu Yue, Yang Zhigang, Liu Yong, et al. Incomplete closure characteristic of piezoelectric pump check valve in high frequency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 262-266. (in Chinese)
- 3 张建辉,路计庄,夏齐霄,等. 细胞或高分子输送用“Y”形流管无阀压电泵的工作原理及流量特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 92-99.
Zhang Jianhui, Lu Jizhuang, Xia Qixiao, et al. Working principle and characteristics of valve-less piezoelectric pump with Y-shape tubes for transporting cells and macromolecule[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 92-99. (in Chinese)
- 4 夏齐霄,张建辉,雷红,等. 非对称群峰结构无阀压电泵的理论分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2391-2397.
Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Lei Hong, et al. Theoretical analysis of novel valve-less piezoelectric pump with cluster of unsymmetrical hump structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2391-2397. (in Chinese)
- 5 Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Lei Hong, et al. Theoretical analysis and experimental verification on flow field of piezoelectric pump with unsymmetrical slopes element[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(5): 735-744. (in Chinese)
- 6 何秀华,张睿,杨嵩,等. “V”型无阀压电泵的流阻特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 242-246.
He Xiuhua, Zhang Rui, Yang Song, et al. Property of flow resistance for piezoelectric pump with “V”-shape tube[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 242-246. (in Chinese)
- 7 Hu Xiaohui, Zhang Jianhui, Huang Yi, et al. Principle and experimental verification of caudal-fin-type piezo-stack pump with variable-cross-section oscillating vibrator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(1): 128-136. (in Chinese)
- 8 胡笑奇,张建辉,夏齐霄,等. 柔性尾长对尾鳍式压电泵的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 167-173.
Hu Xiaohui, Zhang Jianhui, Xia Qixiao, et al. Influence from length of flexible caudal-fin for caudal-fin-type piezoelectric pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 167-173. (in Chinese)
- 9 黄俊,张建辉,王守印. 多级“Y”型流管无阀压电泵的原理与试验验证[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 423-430.
Huang Jun, Zhang Jianhui, Wang Shouyin. Theory and experimental verification on valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 423-430. (in Chinese)
- 10 邓志丹,何秀华,杨嵩,等. 无阀压电泵用椭圆组合管正交优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 284-288, 278.
Deng Zhidan, He Xiuhua, Yang Song, et al. Orthogonal optimization design and experiment of oval composite tube in valveless piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 284-288, 278. (in Chinese)
- 11 Lintel V H, Pol V D F, Bouwstra S. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon[J]. Sensors and Actuators, 1988, 15(2): 153-167.
- 12 Shoji S, Nakagawa S, Esashi M. Micropump and sample-injector for integrated chemical analyzing systems[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1990, 21(1-3): 189-192.
- 13 阚君武,宣明,杨志刚,等. 微型药品输送压电泵的性能分析与试验研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, 22(4): 809-813.
Kan Junwu, Xuan Ming, Yang Zhigang, et al. Analysis and test of piezoelectric micropump for drug delivery[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2005, 22(4): 809-813. (in Chinese)
- 14 Ederer I, Raetsch P, Schullerus W, et al. Piezoelectrically driven micropump for on-demand fuel-drop generation in an automobile heater with continuously adjustable power output[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1997, 62(1-3): 752-755.
- 15 陈强,毕晓华,李雪梅,等. 植物水培装置的改进与创新[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(1): 66-67, 78.
- 16 张寄阳,段爱旺,申孝军,等. 基于蒸发量的膜下滴灌棉花灌溉预警装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 56-59, 89.
Zhang Jiyang, Duan Aiwang, Shen Xiaojun, et al. Design and experiment of scheduling irrigation device based on pan evaporation for drip-irrigated cotton under plastic mulch[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 56-

59,89. (in Chinese)

17 李加念,洪添胜,倪慧娜. 基于太阳能的微灌系统恒压供水自动控制装置研制[J]. 农业机械学报, 2013, 29(12): 86-92.
Li Jianian, Hong Tiansheng, Ni Huina. Invention of constant pressure water supply micro-irrigation system in automatic control based on solar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 29(12): 86-92. (in Chinese)

18 纪晶,张建辉,赵淳生. 阻流体阻流无阀压电泵: 中国, 2012 1 0396143. X [P]. 2012-10-18.

19 Tsuji Y, Morikawa Y, Terashima K. Fluid-dynamic interaction between two spheres [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(1):71-82.

20 Schouveiler L, Brydon A, Leweke T, et al. Interactions of the wakes of two spheres placed side by side[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2004, 23(1):137-145.

21 韩守磊,曾卓雄,徐义华,等. 并列双圆球数值模拟[J]. 南昌航空大学学报:自然科学版, 2007, 21(4): 29-34.
Han Shoulei, Zeng Zhuoxiong, Xu Yihua, et al. Numerical simulation for flow-past two spheres in up and down arrangement[J]. Journal of Nanchang Hangkong University: Natural Science, 2007, 21(4): 29-34. (in Chinese)

22 滕丽娟. 不同排列方式下的双圆柱、三圆柱绕流数值模拟[D]. 保定: 河北工程大学, 2009.

23 Alam M M, Moriya M, Sakamoto H. Aerodynamic characteristics of two side by side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon[J]. Journal of Fluids and Structure, 2003, 18(3-4): 325-346.

24 Ji Jing, Zhang Jianhui, Xia Qixiao, et al. Theoretical analysis and experimental verification on valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment bluff-body[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 595-605.

25 张建辉,王守印,杨东平. 压电锥形流管无阀泵的研究-振动解析及泵体容积变化量[J]. 压电与声光, 1999, 21(6): 457-460.
Zhang Jianhui, Wang Shouyin, Yang Dongping. A study on a valveless piezoelectric diffuser/nozzle-based fluid pump: Analysis of vibration and changed amount of the chamber volume[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1999, 21(6): 457-460. (in Chinese)

Flow Resistance Interference Property of Hemisphere-segment
Arranged in Transverse for Valve-less Piezoelectric Pump

Ji Jing^{1,2} Zhang Jianhui¹ Chen Daogen¹ Zhao Chunsheng¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: In order to analyze the flow resistance property of the hemisphere-segment arranged in transverse for the valve-less piezoelectric pump with bluff-body and the influence of the hemisphere-segment on the output performance of the pump, the flow resistance action law of multiple hemisphere-segments arranged in transverse in pump chamber was studied. Based on the research of single hemisphere-segment flow resistance and the analysis of influence factors for hemisphere-segments arranged in transverse, the action laws of flow resistance interference coefficient and flow resistance coefficient for two hemisphere-segments arranged in transverse were obtained by experiments. Then the theoretical calculation of transverse flow resistance interference coefficient and flow resistance coefficient for multiple hemisphere-segments was derived. And the experiments on flow resistance and flow rate were carried out by using four hemisphere-segments arranged in transverse. The theoretical derivation was proved to be feasible for analyzing and predicting the flow resistance property and the flow rate of such valve-less piezoelectric pump with bluff-body. When the driving voltage was set to 120 V and driving frequency was set to 6 Hz, the flow rate of the pump reached to 44.78 mL/min. And the average deviation between theoretical and experimental was 39.34%.

Key words: Valve-less piezoelectric pump Hemisphere-segment Bluff-body Transverse arrangement Property analysis