

零迎流角半球缺群无阀压电泵流阻与流量特性研究^{*}

纪晶¹ 徐安坡² 张建辉³

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 青岛钢铁控股集团有限公司, 青岛 266043;

3. 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)

摘要: 半球缺群相比于单一的半球缺具有更好的正、反向流体阻力不等特性, 为分析其流阻变化对泵送性能的影响, 对泵腔内半球缺群的行数、列数及行列间距的变化进行了研究。推导出半球缺群的正、反向阻力系数作用规律, 流阻试验及泵流量试验验证了该规律分析计算流阻及泵流量的可行性; 在有限行、列间距范围内, 计算及试验流阻差及泵流量均随半球缺群行数、列数的增加而增加; 在驱动电压及频率为 120 V、6 Hz 时, 半球缺群 3×4、4×3、4×4 行列分别获得 45.5 mL/min、46.2 mL/min、47.75 mL/min 泵流量; 理论与试验流量的最大偏差为 23.23%。研究表明, 半球缺群的流阻作用规律可以用来分析及预测泵流量; 增加行数及列数并适当控制行、列间距均能提高泵流量, 且增加行数比增加列数能获得更好的输出效果。

关键词: 无阀 压电泵 半球缺群 流阻 阻力系数 泵流量

中图分类号: TH35; TH38 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)09-0373-06

Flow Resistance and Flow Properties of Valve-less Piezoelectric Pump with Zero Flow-facing Angle Hemisphere-segment Group

Ji Jing¹ Xu Anpo² Zhang Jianhui³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

2. Qingdao Iron and Steel Holding Group Co., Ltd., Qingdao 266043, China 3. State Key Laboratory of Mechanics and

Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Compared with single hemisphere-segment, hemisphere-segment group has better forward and reverse unequal fluid resistance properties. In order to analyze the impact of flow resistance variation on pumping performance, the changes of row number, column number and intervals for hemisphere-segment group in pump chamber were studied. Forward and reverse flow resistance coefficient formulas of hemisphere-segment group were derived and verified by the flow resistance experiment and flow rate experiment of the pump. In the range of limited row and column intervals, the experimental and theoretical flow resistance difference and flow rate increased along with the increase of row and column numbers. At the driving voltage of 120 V and the driving frequency of 6 Hz, the valve-less piezoelectric pumps with hemisphere-segment group in rows and columns 3×4, 4×3, 4×4 respectively obtained the pump flow rates of 45.5 mL/min, 46.2 mL/min, 47.75 mL/min. The maximum deviation of theoretical relative to experimental flow rate was 23.23%. The results showed that the flow resistance law of hemisphere-segment group could be used to analyze and predict the pump flow rate; the pump output flow rate can be increased by increasing the row number or column number meanwhile properly limiting the row interval and column interval. The better output performance can be obtained by increasing row number than column number.

Key words: Valve-less Piezoelectric pump Hemisphere-segment group Flow resistance Resistance coefficient Pumping flow

收稿日期: 2015-01-04 修回日期: 2015-02-26

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51375227)

作者简介: 纪晶, 讲师, 博士, 主要从事新型压电泵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及压电流体执行器研究, E-mail: zhangjh@nuaa.edu.cn

引言

半球缺阻流体无阀压电泵,是利用置于泵腔中的半球缺球面和圆面对流体阻力不等原理而提出的一种新型阻流体阀类无阀压电泵^[1]。作为1/4球体的半球缺,因其圆面和球面对流体的阻力不等而能保证流体的单向流动。半球缺工艺简单,安装调整方便,使泵既省去了传统的置于泵腔内部、外部的无移动部件阀^[2-9],缩小了泵腔的体积,又避免了泵腔内部的复杂结构^[10-13],因而半球缺阻流体无阀压电泵具有广阔的发展前景。

半球缺的排列方式影响流阻的变化规律进而影响泵的泵送性能。相比于单个半球缺形成的流阻差,按一定规律排列的半球缺群能够形成更大的流阻差,因而能够显著地提高泵送性能。由于半球缺无阀压电泵是一种新型泵,其流阻特性、泵送性能及影响因素等理论研究少有报道。

本文继研究单个半球缺、多个半球缺纵向、横向排列流阻作用规律基础上,分析推导出零迎流角半球缺群的流阻作用规律,继而通过对多组半球缺群的流阻测试及泵流量试验验证该规律是否可以用来分析计算阻力系数及泵理论流量;为探求半球缺群行数、列数及间距变化对泵流量的影响,进行若干组泵流量试验,得出改变半球缺群的行数、列数及行列间距对泵输出性能的影响规律。

1 半球缺群阻流体无阀压电泵

1.1 半球缺群阻流体无阀压电泵结构

图1为半球缺群阻流体无阀压电泵结构图,其由泵腔、泵座、双晶片压电振子、矩形排列半球缺群及密封圈组成。其中半球缺是以直径为8 mm的钢球切割得到的1/4球体。由流体力学可知,球面对流体的阻力小于圆面,所以球面对着的管口是泵的入口,圆面对着的管口是泵的出口。流体由入口流入,绕过半球缺群的球面经出口排出的流动视为正向流动;反之,流体由出口流入,绕过半球缺群的圆面经入口排出的流动则视为反向流动。由于压电振子的往复振动,引起泵腔体积及压强的规律变化,就形成了泵的往复吸、排工作过程;因圆面的阻力大于球面,所以正向流动时吸入及排出的流体均多于反向,振子的循环往复振动就形成了泵腔内流体的单向流动。

1.2 前期研究结果概述

1.2.1 单个半球缺绕流阻力计算式

若 Re_{p1} 、 Re_{p2} 分别为由等效流阻直径 d_1 、 d_2 定义的雷诺数,则计算半球缺的正、反向绕流阻力系数关

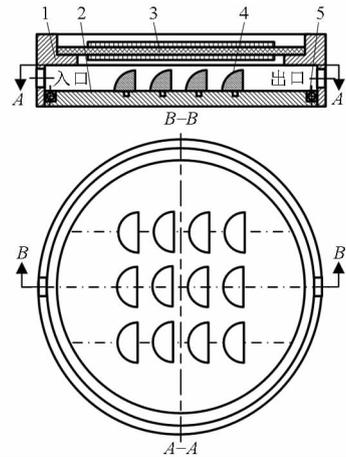


图1 半球缺群阻流体无阀压电泵结构图

Fig. 1 Structure diagram of valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment group bluff-body

1. 泵腔 2. 泵座 3. 压电振子 4. 半球缺群 5. O形密封圈

系式为

$$C_{Dz} = \frac{1.955}{Re_{p1}^{0.494}} \quad (1)$$

$$C_{Dr} = \frac{1.351}{Re_{p2}^{0.381}} \quad (2)$$

1.2.2 半球缺纵向排列遮流影响系数

纵向排列的两个半球缺,当间距较小时,后半球缺因前半球缺的遮流作用而处在前者的尾流影响区内,致后者产生阻力变化,后者又反作用于前者,使总阻力发生变化。两个半球缺正、反向遮流系数 α_z 、 α_r 随纵向间距比 S_z/d 变化的表达式为^[14]

$$\alpha_z = \begin{cases} -0.545 + 0.33 \frac{S_z}{d_1} + 0.002 \left(\frac{S_z}{d_1} \right)^2 - \\ 0.002 \left(\frac{S_z}{d_1} \right)^3 & (0.73 \leq \frac{S_z}{d_1} < 6.55) \\ 1 & \left(\frac{S_z}{d_1} \geq 6.55 \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha_r = \begin{cases} -0.399 + 0.229 \frac{S_z}{d_2} + 0.041 \left(\frac{S_z}{d_2} \right)^2 - \\ 0.007 \left(\frac{S_z}{d_2} \right)^3 & (0.6 \leq \frac{S_z}{d_2} < 5.40) \\ 1 & \left(\frac{S_z}{d_2} \geq 5.40 \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中 S_z ——纵向排列半球缺的间距

1.2.3 半球缺横向排列干扰影响系数

横向排列的两个半球缺,间距较小时,半球缺间的流体彼此干扰、相互碰撞较强烈,导致绕流阻力发生变化。两个半球缺正、反向干扰系数 β_z 、 β_r 随横向间距比 S_H/R 变化的表达式为^[15]

$$\beta_z = \begin{cases} 1.518 - 0.036 \frac{S_H}{R} - 0.026 \left(\frac{S_H}{R}\right)^2 + \\ 0.003 \left(\frac{S_H}{R}\right)^3 & (2 \leq \frac{S_H}{R} < 6) \\ 1 & (\frac{S_H}{R} \geq 6) \end{cases} \quad (5)$$

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

式中 S_H ——横向排列半球缺的间距
 R ——半球缺的半径

2 零迎流角矩形排列半球缺群绕流阻力规律

泵腔内半球缺的排列方式、数量及方位与半球缺群无阀泵内流体的流动阻力及泵送流体的能力密切相关。以下仅就矩形排列半球缺群零迎流角情况下行数、列数及行、列间距的变化对流体阻力及泵送性能的影响进行分析和探讨。

2.1 零迎流角矩形排列半球缺群的定义

以正向绕流如图2所示的半球缺群为例，因其外包络线呈矩形，且其所在行方向与流速夹角为零度，定义如此排列的半球缺群为零迎流角矩形排列半球缺群。

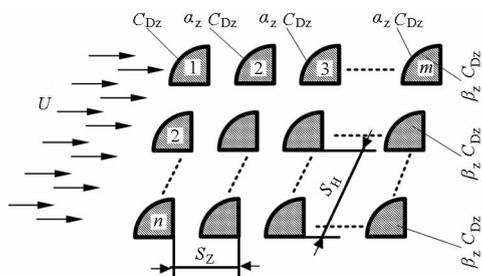


图2 零迎流角半球缺群正向阻力系数示意图
 Fig.2 Diagram of forward resistance coefficient for flow-facing angle 0° and rectangular arrangement hemisphere-segment group

图2中半球缺共 n 行 m 列，半球缺总个数 $N = mn$ ；沿流向每行 m 个半球缺，垂流向每列 n 个半球缺；相邻两列半球缺圆面间距离 S_z 定义为纵向间距，相邻两行半球缺中心截面间的距离定义为横向间距 S_H ； S_z 与 S_H 可能相等也可能不等，为研究方便，行内及列内间距均相等。

2.2 零迎流角半球缺群总阻力系数表达式的推导

图2中，对于纵向排列的半球缺，因第1列半球缺对后面 $m - 1$ 列半球缺的遮流作用，导致后者的阻力发生变化。设 $1 \times m$ 中第1列半球缺的绕流阻

力系数为 C_{Dz} ，第2,3, ..., m 列在第1列遮流影响下其被遮流的程度相近，遮流系数用 α_z 表示，则其阻力系数也相近，近似表示为第1列半球缺阻力系数的 α_z 倍，即 $\alpha_z C_{Dz}$ ，则 $1 \times m$ 列半球缺总阻力系数表达式为 $\sum C_{Dzm} = C_{Dz} + \alpha_z(m - 1)C_{Dz}$ ；对于横向排列的半球缺，因流体相互干扰强烈，半球缺之间水流被挤压，导致绕流阻力发生变化。因半球缺的各迎流面处在同一流场中，对流体的碰撞、挤压及干扰的程度近似相同，即流体间的干扰系数 β_z 相同，则行数增加至 $n \times 1$ 时的总阻力系数近似为单个半球缺的 $n\beta_z$ 倍，即 $n\beta_z C_{Dz}$ 。基于单个半球缺绕流阻力计算和半球缺间遮流系数 α_z 、干扰系数 β_z 计算基础上，根据绕流场的水头损失叠加原理，本文递推出零迎流角矩形排列半球缺群 $n \times m$ 正向总阻力系数的表达式为

$$\sum C_{Dzmn} = n\beta_z [1 + (m - 1)\alpha_z] C_{Dz} \quad (7)$$

同理，反向总阻力系数表达式为

$$\sum C_{Dfmn} = n\beta_f [1 + (m - 1)\alpha_f] C_{Df} \quad (8)$$

C_{Dz} 、 C_{Df} 、 α_z 、 α_f 、 β_z 、 β_f 定义同前，表达式参见式(1)~(6)。

3 零迎流角半球缺群绕流阻力验证与分析

为验证式(7)、(8)用于分析、计算泵腔内流阻的可行性，同时进一步研究半球缺的行数、列数变化对反、正向流阻差的影响，以下进行改变行数、列数的半球缺群阻力系数测试及分析。图3是待测试的行数、列数变化的半球缺群照片。图中纵向、横向间距相等($S_z = S_H = 12 \text{ mm}$)，待测试半球缺个数从 1×1 开始，逐次增加其行数、列数至 4×4 (由于半球缺数量的限制，半球缺群 4×4 没有拍到图3中)。测试介质为纯净水，测试装置及测试原理参见文献[16]。

表1是测试得到的阻力系数与利用式(7)、(8)

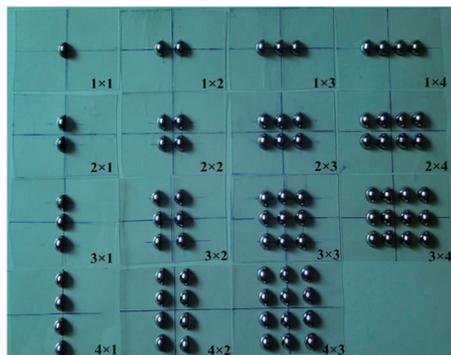


图3 行数及列数变化的半球缺群流阻测试试验照片
 Fig.3 Picture of flow resistance test by using hemisphere-segment group with different rows and columns

表1 变行数、列数半球缺群计算与测试阻力系数比较
Tab.1 Theoretical and experimental flow resistance comparison by using hemisphere-segment group with different numbers of rows and columns

行数× 列数	阻力系数 试验值		阻力系数 计算值		计算值与试验 值偏差/%	
	正向	反向	正向	反向	正向	反向
	1×1	0.031 3	0.053 7	0.030 2	0.058 1	-3.47
1×2	0.032 0	0.055 6	0.035 2	0.064 2	8.98	13.3
1×3	0.033 1	0.058 6	0.040 1	0.070 3	17.42	16.56
1×4	0.036 1	0.062 0	0.045 1	0.076 4	19.87	18.77
2×1	0.039 9	0.084 1	0.076 0	0.140 9	47.55	40.34
2×2	0.042 1	0.087 9	0.088 5	0.155 7	52.39	43.56
2×3	0.045 5	0.095 2	0.100 9	0.170 5	54.93	44.18
2×4	0.046 2	0.099 4	0.113 4	0.185 3	59.21	46.35
3×1	0.047 0	0.107 1	0.114 0	0.211 4	63.06	55.70
3×2	0.053 4	0.111 0	0.132 7	0.233 6	64.87	57.61
3×3	0.060 5	0.112 1	0.151 4	0.255 7	65.73	58.72
3×4	0.063 6	0.112 9	0.170 0	0.277 9	66.17	59.52
4×1	0.065 1	0.114 4	0.152 0	0.281 8	61.67	60.63
4×2	0.066 6	0.115 2	0.176 9	0.311 4	64.29	62.50
4×3	0.068 9	0.115 6	0.201 8	0.341 0	66.82	64.28
4×4	0.070 7	0.126 5	0.226 7	0.370 6	68.79	65.87

得到的计算值及二者偏差的比较。

分析表1可知,正、反向阻力系数计算值与试验值均随着行数及列数的增加而增加,二者变化趋势一致;同时,随着行数、列数的增加,阻力系数计算值与试验值的偏差增加明显。这主要是因为随着行数、列数的增加,半球缺间的流体相互干扰、遮挡及碰撞加剧,旋涡生成及迂回现象严重,使绕流场发生复杂的变化,阻力系数表达式难以反映流场的复杂状况,致使与试验结果偏差较大。试验结果表明,在低行数、列数范围内阻力系数的变化规律与试验结果误差较小,二者变化趋势比较接近;在高行数、列数时需要参考试验数值进行适当修正。

综合分析认为零迎流角半球缺群的绕流阻力系数关系式,能够反映半球缺群的流阻变化趋势,经部分修正后可用于分析、计算泵内流阻值。

基于无阀压电泵的泵送原理,若半球缺群的正向流阻越小、反向流阻越大,则泵送流体的能力越强。图4是半球缺群的试验流阻差随行数、列数变化的关系曲线。分析图4可知,反、正向流阻差随着半球缺行数及列数的增加而增加;其中行数 n 的增加,使流阻差的增加更为显著;尤其是由1行增加到2行后,其流阻差增加幅度较大;而3行和4行的半球缺群流阻差的增加较缓慢。分析原因认为,增加列数,可导致后面的半球缺因前面半球缺的遮挡作用而使绕流阻力减小,使总阻力系数的增加幅度大大滞后于列数增加的幅度;增加行数,由于半球缺间

的流体干扰严重,会增大绕流阻力,使总阻力系数增加的程度趋于行数增加的程度;特别对于2行的半球缺群,其对流体的干扰、撞击等作用大面积地传递到附近的流体区域并阻碍着流体的流动,扰动剧烈,明显地增加了流体绕流半球缺的阻力;对于3行和4行的半球缺群,其对流体的阻挡、扰动的区域显著增加,流体间的相互干扰强烈,但由于半球缺群内部流体间的碰撞、迂回及干扰会彼此抵消大部分作用力,同时,旋涡的迂回流动也会使正、反向流阻增大,因而总阻力系数的增加幅度明显滞后于 $n=2$ 时的半球缺群。随着行数的继续增加,流阻差会继续增加,但增加的幅度变小。

从以上分析也可看出,同等条件下,增加行数能获得更大的流阻差。

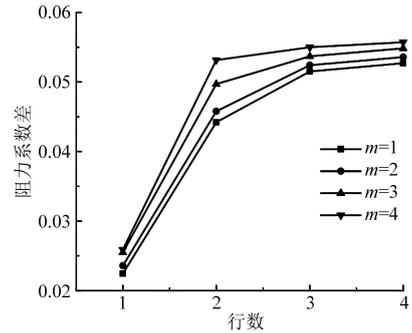


图4 半球缺群的试验流阻差与半球缺群行数、列数关系曲线

Fig.4 Relationship curves between experimental flow resistance differences and row number, column number of hemisphere-segment group

图5是半球缺群的计算流阻差与试验流阻差随半球缺群行数、列数变化曲线。分析图5可知,半球缺群的计算流阻差与试验流阻差变化趋势一致;低行数、列数下,计算流阻差接近于试验流阻差,随着行数、列数的增加,二者的偏差增大;其最大偏差为61.27%,最小偏差为15.41%。分析原因认为,阻力系数关系式(式(7)、(8))中的 α_z 、 α_f 、 β_z 、 β_f 与总阻力系数 $\sum C_{Dzmn}$ 、 $\sum C_{Dfmn}$ 近似呈正相关变化,而使计算值接近线性增加;实际绕流场随着行数、列数在圆形流场区域内急剧增加,使流场变得极度紊乱,伴随着边界层的分离、旋涡的生成及迂回等流动现象,使实际绕流阻力的变化不再与 α_z 、 α_f 、 β_z 、 β_f 正相关,所以行数、列数增加的越多偏差就越大。

4 零迎流角半球缺群行数、列数变化对泵送性能的影响

4.1 泵流量试验

为验证式(7)、式(8)用于计算泵理论流量的可

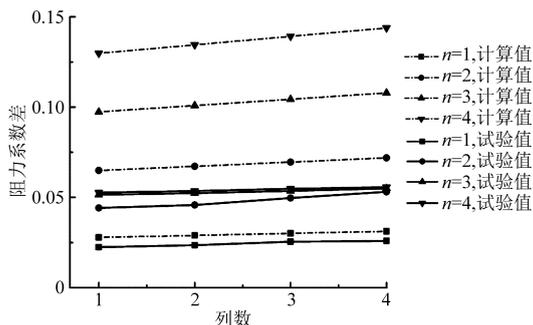


图5 半球缺群阻力系数差计算值、试验值与半球缺群行数、列数的关系曲线

Fig. 5 Change curves of theoretical and experimental flow resistance difference along with change of row and column numbers for hemisphere-segment group

行性及上述试验分析的正确性,并进一步探寻行数、列数变化对泵输出性能的影响,进行行数、列数变化的半球缺群无阀压电泵流量试验。试验的半球缺群图片同图3,半球缺的行、列间距值同前,驱动电压及频率分别取为 $U = 120\text{ V}$ 、 $f = 6\text{ Hz}$,试验所用流体为纯净水。泵流量试验数据如图6所示。

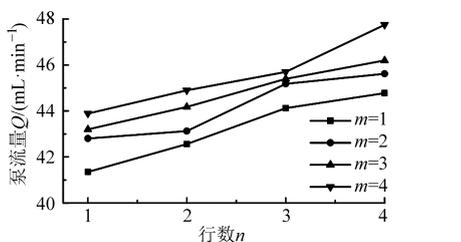


图6 泵试验流量与半球缺群行数、列数关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between experimental flow rate of pump and different row and column numbers of hemisphere-segment group

图6是半球缺群无阀压电泵试验流量随半球缺群行数及列数变化曲线。分析图6可知,增加行数 n 、列数 m ,泵流量也相应增加;当半球缺群的行数、列数分别增加至 4×3 、 3×4 时,泵流量分别达到了 46.2 mL/min 、 45.5 mL/min ;当行数、列数增加至 4×4 时,泵流量达到了 47.75 mL/min 。

综合分析以上数据可知,半球缺群无阀压电泵的泵送性能与半球缺群的行数、列数密切相关,在合适的间距范围内,增加行数、列数均能提高无阀泵的泵送性能;且增加行数比增加列数更有利于泵性能的提高。分析原因认为,增加行数、列数,均可使反、正向流阻差增加,故泵流量随之增加;另外,由前面分析可知,同等条件下,增加行数能获得更大的流阻差,故半球缺群 4×3 对应的无阀压电泵泵送流体的能力高于 3×4 半球缺群。

4.2 泵理论流量与试验流量的比较

泵理论流量 Q_L 计算式为^[1]

$$Q_L = f\Delta V(\zeta_1 - \zeta_2) / [2(1 - \zeta_1\zeta_2)] \quad (9)$$

其中

$$\zeta_1 = [1 - a(1 + \sum C_{Dzmn})]^{1/2} / (1 - a + \sum C_{Dzmn})^{1/2}$$

$$\zeta_2 = (1 - a + \sum C_{Dfmm})^{1/2} / [1 - a(1 + \sum C_{Dfmm})]^{1/2}$$

$$\Delta V = \pi w_0 R_0^2 / 2$$

$$a = A_0^2 / A^2$$

式中 A_0 、 A ——管口截面积与泵腔截面积
 ΔV ——泵腔容积变化量^[17]
 f ——振子的振动频率
 R_0 ——压电振子半径
 w_0 ——压电振子中心点的振动幅值

$\sum C_{Dzmn}$ 、 $\sum C_{Dfmm}$ 同前,可通过式(7)、式(8)计算得到;本文测试得到 $f = 6\text{ Hz}$ 时振子中心振动幅值为 $w_0 = 0.1042\text{ mm}$,泵理论与试验流量随半球缺群行、列变化关系如图7所示。分析图7可知,泵的理论流量及试验流量均随半球缺群行数、列数的增加而增加;行数为1、2,列数为1、2时,理论流量与试验流量的偏差较小;增加行数、列数到3、4时,理论流量与试验流量的偏差增大;其最小及最大偏差分别为 3.22% 、 23.23% 。

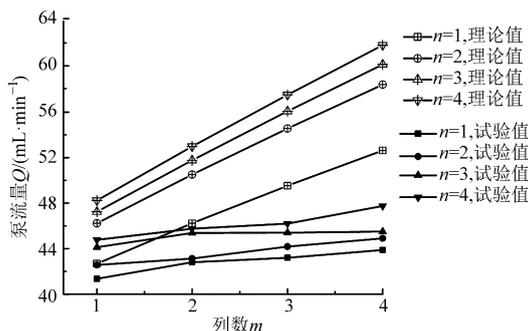


图7 泵理论、试验流量与半球缺群行数、列数比较曲线

Fig. 7 Comparison curves of theoretical pumping flow rate and experimental pumping flow rate along with row number and column number of hemisphere-segment group

分析原因认为,理论流量计算公式是在将瞬态流模型简化为定长流模型后导出的,瞬态流模型由于激波、撞击等流动现象的产生导致机械能不再守恒,这种模型简化后的系统误差导致理论流量计算值偏大;试验流量测试中,流体绕过半球缺群后会产生大量旋涡,造成流体能量的损耗,使试验流量减小;另外,气穴、泵腔密封性、环境条件、人为因素等在一定程度上也将影响泵的试验流量。

理论分析及试验研究表明,增加半球缺群的行数、列数,能够增大流体绕流半球缺群的反、正向流阻差,进而增加泵流量;在泵腔的有限空间内,增加半球缺群的行数比增加列数更能提高泵的输出能

力。另外,结合文献[14-15]可知,适当增加群内半球缺的纵向间距、减小横向间距,同样能够使绕流半球缺群的反正向流阻差增加,因而泵流量增加。

5 结论

(1)基于半球缺群比半球缺能够形成更大的反、正向流阻差,推导出半球缺群的正、反向阻力系数关系式并进行了试验验证;同时,流阻试验得到了合适间距范围内增加半球缺群的行数及列数,均能

增大绕流半球缺群的反、正向流阻差的结论,发现了增加行数比增加列数能够获得更大流阻差的现象。

(2)泵流量试验验证了半球缺群的阻力系数关系式用于分析、计算泵流量的可行性;同时,探寻到合适间距范围内增加半球缺群的行数及列数均能增大反正向流阻差因而能够提高泵送性能的规律。

(3)泵流量试验验证了相同试验条件下,增加行数比增加列数能获得更好输出效果的结论。

参 考 文 献

- 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.
- Eric S, Goran S. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1993, 39(2): 159-167.
- Foster F K, Bardell R L, Blanchard A P, et al. Micropumps with fixed valves: US, 5876187[P]. 1999-03-02.
- Ederer I, Raetsch P S, Chullerus 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.
- 张建辉, 黎毅力, 夏齐霄. “Y”形流管无阀压电泵流量及流管流阻特性分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 136-141. Zhang Jianhui, Li Yili, Xia Qixiao. Analysis of the pump volume flow rate and tube property of the piezoelectric valveless pump with Y-shape tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 136-141. (in Chinese)
- Huang Jun, Zhang Jianhui, Wang Houyin, et al. Analysis of the flow rate characteristics of valveless piezoelectric pump with fractal-like Y-shape branching tubes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 628-634.
- 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)
- 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)
- 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)
- 吴丽萍. 扁锥腔无阀压电泵理论与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008. Wu Liping. Theoretical and experimental research of valveless piezoelectric pump with flat-cone-shape pump chamber[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in China)
- 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)
- 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.
- Hu Xiaoqi, 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.
- 纪晶, 张建辉, 季瑞男, 等. 半球缺纵向排列对半球缺阻流体无阀泵的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(6): 1-8. Ji Jing, Zhang Jianhui, Ji Ruinan, et al. Effect of hemisphere-segments longitudinal arrangement on valve-less piezoelectric pump [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(6): 1-8. (in Chinese)
- 纪晶, 张建辉, 陈道根, 等. 无阀压电泵半球缺阻流体横向排列流阻干扰特性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 340-346. Ji Jing, Zhang Jianhui, Chen Daogen, et al. Research on flow resistance interference property of hemisphere-segment arranging in transverse for valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 340-346. (in Chinese)
- 纪晶, 胡彩旗. 无阀压电泵流阻测试装置及应用研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 322-327. Ji Jing, Hu Caiqi. Flow resistance testing device of valve-less piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 322-327. (in Chinese)
- 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)