

半球缺无阀压电泵泵送性能优化分析*

胡彩旗 纪 晶

(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 半球缺的排列方式、数量及间距直接影响半球缺无阀泵的泵送性能。通过对泵理论流量的推导,揭示了半球缺无阀泵具有泵送流体性能的机理;通过对纵向及横向排列半球缺数量及间距的变化对流场及仿真流量影响的研究,发现半球缺排列方式、间距及数量的改变其实是改变了半球缺的反正向流阻差这一重要现象;探明了减小横向间距、适当增加纵向间距及适当间距范围内增加半球缺的数量均能提高泵流量的重要规律;最后,通过泵流量试验验证了仿真结论的正确性;以安装有4个纵向及横向等间距10 mm排列半球缺的泵进行试验,分别得到了48.29 mL/min、50.29 mL/min的试验流量,与仿真流量的偏差分别为34.6%、34.0%,进一步验证了相同条件下增加横向排列半球缺数量能获得更好的泵送效果。

关键词: 无阀压电泵 半球缺 纵向 横向 性能分析

中图分类号: TH35; TH38 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0325-08

Optimization Analysis of Pumping Performance for Valve-less Piezoelectric Pump with Hemisphere-segment

Hu Caiqi Ji Jing

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

Abstract: The arrangement, number and spacing of hemisphere-segments directly influence the pumping performance of pump. By deducing theoretical pumping flow rate, the essential reason of pumping fluid was revealed. Flow field and simulation flow rate of pump were studied with different numbers and spacings of hemisphere-segments respectively arranged in longitudinal and transverse directions. And the result shows that the changes of arrangement, number and spacing of hemisphere-segments mean that the flow resistance differences between reverse and forward flows were changed. The rules were proved that reducing the transverse spacing, appropriately increasing the longitudinal spacing and increasing hemisphere-segment quantity in proper spacing range could all enhance the pump flow rate. Finally, the simulation conclusion was verified by using pump flow rate test. The experiments were carried out by valve-less pumps installed in four hemisphere-segments with the same spacings of 10 mm arranged in longitudinal and transverse directions, and the experimental flow rates were respectively 48.29 mL/min and 50.29 mL/min; the deviations between experimental and simulation flow rates were respectively 34.6% and 34.0%. The conclusion is further validated that under the same conditions, the better pumping effect can be obtained by increasing the number of hemisphere-segments in transverse arrangement than that in longitudinal arrangement.

Key words: Valve-less piezoelectric pump Hemisphere-segment Longitudinal direction Transverse Performance analysis

收稿日期: 2014-10-08 修回日期: 2014-10-30

* 国家自然科学基金资助项目(51375227)

作者简介: 胡彩旗,副教授,博士,主要从事流体机械性能分析和优化设计研究, E-mail: hucaiqli@163.com

引言

滴灌、微灌技术是目前行之有效的高效灌溉技术,滴水器是其中的关键部件。滴水器的作用是保证毛管中的压力水流稳定、均匀地输出^[1-2]。滴水器一般应满足出水均匀、出水量少、抗堵塞、结构简单、易安装、坚固耐用等要求^[3-4]。无阀压电泵能够实现微流量输出^[5-7],同时具有结构简单、能耗低、输出流量可控性好和因无运动部件间的磨损而使可靠性及寿命得到保证^[8-10]等优点,作为微流量泵水装置在滴灌和微滴灌系统中具有广阔的发展前景,特别适用于实验室新作物培育定时定量滴水或营养液的滴灌系统中。

半球缺阻流体无阀压电泵是以半球缺(1/4球)作为无移动阀件,通过圆面与球面对流体的流阻差并配合压电振子的周期振动实现对流体的泵送。半球缺个数、间距及其排列方式直接影响泵送性能,尤其是多个半球缺纵向或横向排列时泵腔内流场复杂,其流场的变化对泵送性能的影响亟待深入研究。

本文基于半球缺无阀泵结构分析基础,推导出泵的理论流量并对泵的成因进行理论解析;通过数值仿真软件分析改变半球缺间距、数量及排列方式对压电泵腔内流场和流量影响的原因及规律,总结出增加纵向间距、减小横向间距及增加纵、横向排列半球缺数量均能提升泵流量的规律,并通过泵流量试验对仿真分析结果进行相应验证。

1 压电泵结构

图1是4个半球缺纵向排列的半球缺无阀压电泵结构,由半球缺、压电振子、泵腔、泵腔螺纹盖、泵座及密封装置构成。与传统无阀压电泵结构上的区别是泵腔和泵盖结合处用内螺纹联结,省去了均布螺栓联结的结构,使泵的结构更加紧凑、拆装方便、密封性更好。因半球缺的球面和圆面对流体的阻力不同,将其置于泵腔中即形成了无移动部件阀,在压电振子的上下交替振动下,泵腔内的压强发生由小到大的周期性变化,使流体经由两管口同时流入或流出泵腔的体积不同,从而产生单向流动。图1中的半球缺朝向一致、等间距直线排列,其排列形成的直线方向与泵的两管口方向一致。因半球缺的球面对流体的阻碍效应小于圆面,所以球面正对着的管口流入的流体多于圆面正对管口流入的流体;反之,圆面正对着的管口流出的流体多于球面正对管口流出的流体,所以,球面和圆面正对着的管口分别作为入口管和出口管。为研究方便,定义流体由入口管流入、经出口管排出的流动为正向流动,简称正流;

反之,由出口管流入、经入口管流出的流动为反向流动,简称反流。

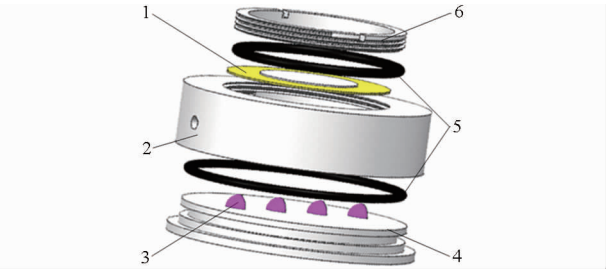


图1 半球缺纵向排列的无阀压电泵结构简图
Fig.1 Valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segments arranged in longitudinal direction

1. 压电振子 2. 泵腔 3. 半球缺 4. 泵座 5. 密封圈
6. 螺纹泵盖

2 泵理论解析

根据Singhal等的理论^[11-13],压电泵对流体的输送性能取决于无移动部件阀的特性,对半球缺无阀压电泵而言,流体正流、反流的压强损失与流体的流阻系数、流速、密度存在关系

$$\Delta p_z = C_{Dz} \rho v_z^2 / 2 \tag{1}$$

$$\Delta p_f = C_{Df} \rho v_f^2 / 2 \tag{2}$$

式中 $\Delta p_z, \Delta p_f$ ——正、反流压强损失
 C_{Dz}, C_{Df} ——正、反向绕流单个半球缺阻力系数
 v_z, v_f ——正流、反流平均速率
 ρ ——流体密度

多个半球缺纵向或横向排列时,由于半球缺间对流体的相互遮挡或彼此干扰,致使绕流阻力发生复杂的变化^[14-16],其纵向及横向排列的正、反向绕流总阻力系数分别为

$$\sum_{i=1}^m C_{Dz} = [1 + (m - 1) \beta_{sz}] C_{Dz} \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^m C_{Df} = [1 + (m - 1) \beta_{sf}] C_{Df} \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^n C_{Dz} = n \beta_{Hz} C_{Dz} \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^n C_{Df} = n \beta_{Hf} C_{Df} \tag{6}$$

式中 m, n ——纵向、横向排列半球缺的个数
 β_{sz}, β_{sf} ——正、反向绕流半球缺的遮流系数
 β_{Hz}, β_{Hf} ——正、反向绕流半球缺的干扰系数

假设流体不可压缩,则压电泵工作时,入口处的压差和出口处的压差相等,即 $\Delta p_z = \Delta p_f$,由式(1)~(6)可推导出正、反向流动时纵向及横向排列半球缺出口、入口流管内的平均流量

$$\begin{bmatrix} Q_{Zz} \\ Q_{Zf} \\ Q_{Hz} \\ Q_{Hf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_z \\ \zeta_z \\ \zeta_H \\ \zeta_H \end{bmatrix} \left[\sum_{i=1}^m C_{Dz} \quad \sum_{i=1}^m C_{Df} \quad \sum_{j=1}^n C_{Dz} \quad \sum_{j=1}^n C_{Df} \right] \quad (7)$$

其中 $\zeta_z = A(2\Delta p_z/\rho)^{1/2}$ $\zeta_H = A(2\Delta p_H/\rho)^{1/2}$
式中 A ——出口管、入口管的横截面积
 Δp_z 、 Δp_H ——纵向和横向排列时压强损失
 Q_{Zz} 、 Q_{Zf} 、 Q_{Hz} 、 Q_{Hf} ——纵向及横向排列时正、反向管口的平均流量

泵单位时间的净流量可以通过入口管或出口管的流量差 ΔQ 计算,纵向及横向排列的半球缺其流量差分别为

$$\Delta Q_z = \zeta_z \left[\left(\sum_{i=1}^m C_{Dz} \right)^{-1/2} - \left(\sum_{i=1}^m C_{Df} \right)^{-1/2} \right] \quad (8)$$

$$\Delta Q_H = \zeta_H \left[\left(\sum_{j=1}^n C_{Dz} \right)^{-1/2} - \left(\sum_{j=1}^n C_{Df} \right)^{-1/2} \right] \quad (9)$$

根据压电振子从平衡位置开始运动到最大位置时的泵腔容积变化量 $\Delta V^{[13]}$ 在数值上即是出口、入口管的流量之和而得出

$$\zeta_z = \frac{\Delta V}{2 \left[\left(\sum_{i=1}^m C_{Dz} \right)^{-1/2} + \left(\sum_{i=1}^m C_{Df} \right)^{-1/2} \right]} \quad (10)$$

$$\zeta_H = \frac{\Delta V}{2 \left[\left(\sum_{j=1}^n C_{Dz} \right)^{-1/2} + \left(\sum_{j=1}^n C_{Df} \right)^{-1/2} \right]} \quad (11)$$

在压电振子振动的一个周期内分别经历 2 次吸入及排出流体的过程,且当振子的振动频率为 f 时,综合式(8)~(11)可推导出半球缺纵向及横向排列的泵净流量分别为

$$Q_z = f\Delta V \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m C_{Df} / \sum_{i=1}^m C_{Dz} - 1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m C_{Df} / \sum_{i=1}^m C_{Dz} + 1}} \quad (12)$$

$$Q_H = f\Delta V \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n C_{Df} / \sum_{j=1}^n C_{Dz} - 1}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n C_{Df} / \sum_{j=1}^n C_{Dz} + 1}} \quad (13)$$

式中,纵向及横向排列的半球缺其反向总阻力系数 $\sum_{i=1}^m C_{Df}$ 、 $\sum_{j=1}^n C_{Df}$ 必大于正向总阻力系数 $\sum_{i=1}^m C_{Dz}$ 、 $\sum_{j=1}^n C_{Dz}$,即 $Q_z > 0$ 、 $Q_H > 0$,所以半球缺无阀泵能够产生连续泵送流体的功能,并且二者比值越大,泵送流

体的能力就越强。

但由于绕流纵向排列或横向排列半球缺所形成的流场复杂,流态紊乱,其正向和反向总流阻系数很难通过解析方法精确得到。在本研究中采用仿真分析方法,建立压电泵流场的有限元模型,以获得其流场的速度或压强分布规律,并计算仿真流量,据此探究不同排列方式下半球缺间距、数量的变化对半球缺无阀泵流阻及泵流量的影响规律。

3 半球缺无阀压电泵流场分析

利用 FLUENT 软件的四面体单元建立纵向及横向排列的半球缺无阀泵有限元模型,其结构的几何参数如表 1 所示。流体介质为不可压缩水,密度为 $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$,动力粘度系数为 $\mu = 0.001 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。为与试验结果对比,仿真中采用按正弦变化的速度边界条件来模拟压电振子的上下振动,出入口采用标准大气压。

表 1 泵结构的仿真参数

Tab.1 Pump structure parameters for simulation

参数	mm					
	半球缺	管口	振子	泵腔	泵腔	
	半径	直径	直径	高度	外径	内径
数值	4	4	50	6	80	68

3.1 两个半球缺不同间距比对流场及流量的影响

3.1.1 两个半球缺纵向排列

当两个半球缺纵向排列时,这两个半球缺在水流作用下,前者遮挡后者,后者对前者又有反作用,这种相互影响的结果导致作用到后者上的水动力发生了变化,因而总阻力也发生了变化,这种变化与纵向排列的半球缺的间距和半径之比有关,同时这种变化必然引起流场速度的变化。图 2 是对半球缺纵向排列变间距比的泵腔流场进行模拟分析得到的流场速度变化规律,设间距比 $\mu = S/R$ (S 是纵向排列两半球缺间的距离, R 为半球缺半径)。

从图 2a 可知,当两个半球缺的纵向间距比 $\mu = 1.5$ 时,其间距较小,正向流动时,来流受到前半球缺的阻挡,处于 1/4 球面区域近处的流体流速降低,流动阻力及阻力系数增加,逐渐涌高的流体在压力驱动下逐渐绕过球面而流向非球面区域,因而非球面区域流速增大,流速沿横向变化的波及面较宽;而后半球缺受前半球缺的遮流作用,后者完全处于前者的尾流漩涡区内或负压区内,受其影响,后者所受阻力减小或出现负值,同时,后者也会抑制前者的漩涡生成及发展,二者距离越近,这种抑制作用越明显,从图中可以看出后半球缺近处区域的流体流速降低,

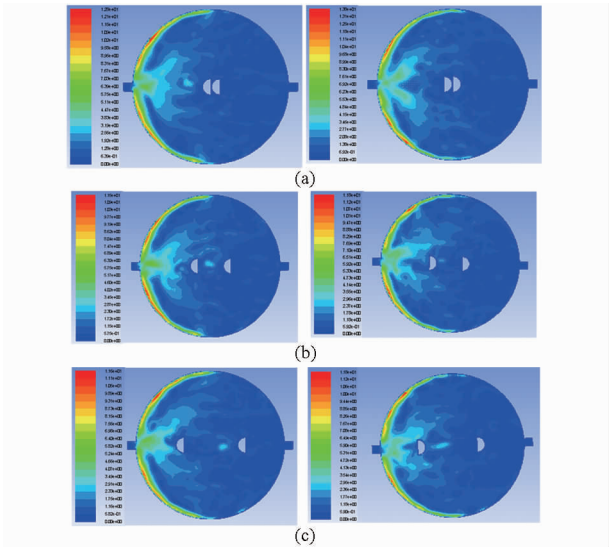


图 2 两个半球缺纵向排列变间距泵腔流场正、反向速度云图

Fig.2 Forward and reverse of flow field velocity contours for two hemisphere-segments arranged in longitudinal direction with different spacing ratios
(a) $\mu = 1.5$ (b) $\mu = 4.5$ (c) $\mu = 7.5$

且两个半球缺之间及其近处区域没有漩涡;反向流动时,从图中可以看出由于两个半球缺综合的阻断效果使得流场出现了明显的流速降低和分岔,这主要是由于1/2圆形平面对流体的阻力要大于1/4球面,所以半圆形平面对流体的阻断、遮流效果及其引起的速度改变及波动范围均显著地强于球面。

当两个半球缺的间距比增至 $\mu = 4.5$ 时,从图 2b 可以看出正、反向来流速度的变化程度弱于间距比为 1.5 时的状态,接近球面或圆面的速度减小及周边区域速度增加均较缓慢,其速度变化的波及面也略微收缩,在两个半球缺之间有漩涡发生。这主要是由于两半球缺中的后者逐渐远离前者的尾涡流场区,后者由于受前者的遮流影响减弱而自身绕流阻力逐渐得到恢复而增加,同时,前者受到后者的抑制作用也减弱,使正反向总阻力系数和流阻差渐趋增加。

随着间距比继续增加至 $\mu = 7.5$,从图 2c 可以看出流场流速沿横向变化及两个半球缺周边流速分布形态与绕流单个半球缺的状态相近。这是由于两个半球缺之间的距离已经超过了能够相互影响的区域,后者不再受前者的遮流作用,前者也摆脱了后者的影响,前者、后者所受到的绕流阻力逐渐恢复至绕流单个半球缺的阻力状态。以上通过改变纵向排列半球缺的间距导致速度场及流动阻力的变化规律与文献[14]试验分析的结论相一致。

3.1.2 两个半球缺横向排列

当两个半球缺横向排列时,其所受绕流阻力的

大小强烈地依赖于两者之间的间距比。间距比减小时,过水断面减小,半球缺间的流体因挤压而相互干扰强烈,迎流面处水位涌高,水流被挤压致使流速变小,因而会改变半球缺上的水动力,使半球缺的绕流阻力随着间距比的变化而变化。图 3 是对半球缺横向排列变间距比的泵腔流场进行模拟分析得到的流场速度变化规律,设间距比 $\alpha = H/R$ (H 是横向排列两半球缺间的距离)。

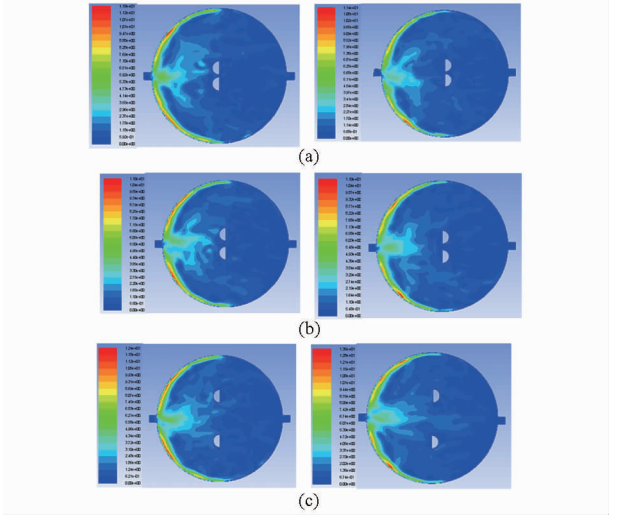


图 3 两个半球缺横向排列变间距泵腔流场正、反向速度云图

Fig.3 Forward and reverse of flow field velocity contours for two hemisphere-segments arranged in transverse with different spacing ratios
(a) $\alpha = 2.5$ (b) $\alpha = 3.0$ (c) $\alpha = 5.5$

图 3a 中,当半球缺的横向间距比为 $\alpha = 2.5$ 时,两半球缺间距较小,当正、反向来流遇到半球缺后,被半球缺的球面或圆面迎流面阻断,过水横断面积突然变窄,导致球面和圆面前的水位急剧累积而涌高,流速减小,与半球缺接触区域外的流体速度增大,横向接近泵腔边缘区域流速改变不大。由于球面及圆面处的水位涌高,使作用到该处的水动力增加,圆面迎流面对水流的阻断效应显著地大于球面,因而反方向阻力增加的更显著,其形成的反、正向流阻差较大。

当增加间距比至 $\alpha = 3.0$ 时,从图 3b 中可以看出流场流速有所增加,因正、反向来流的一部分流体经间隙挤压流出,使间隙外的流体被球面或圆面阻碍程度减轻,水位涌高的程度降低,因而反、正向阻力系数及其差值增加幅度减小。

随着间距比增加至 $\alpha = 5.5$ 时,两半球缺间距较大,从图 3c 中可以看出两个半球缺之间形成较大的间隙,正、反向来流的流体不再受间隙的限制而经由间隙自由流出。这是由于当间距比达到一定数值后两个半球缺间的流体彼此互不掺混而恢复到了绕流

单个半球缺的状态。以上横向排列半球缺间距的变化引起的速度场及流动阻力的变化规律与文献[15]试验分析的结论相一致。

3.1.3 不同间距下两个半球缺纵向、横向排列仿真流量分析

在上述仿真分析基础上,得到变间距下两个半球缺纵向、横向排列单位时间内的输出流量,如图 4 和图 5 所示。

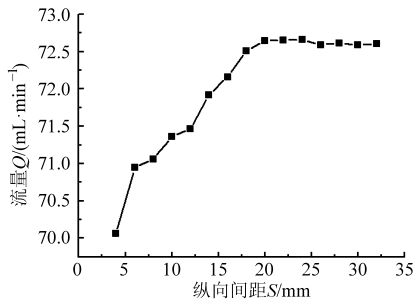


图 4 仿真流量随纵向排列半球缺间距的变化曲线

Fig.4 Curve of simulation flow rate varying along with spacing of two hemisphere-segments arranged in longitudinal direction

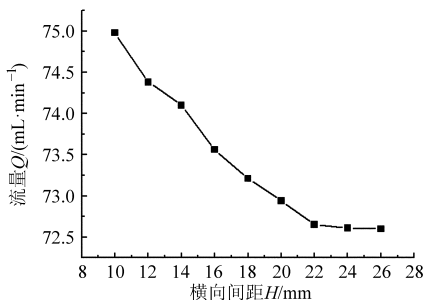


图 5 仿真流量随横向排列半球缺间距的变化曲线

Fig.5 Curve of simulation flow rate varying along with spacing of two hemisphere-segments arranged in transverse

分析图 4 可知,纵向排列的两半球缺,其间距 $S \leq 20\text{ mm}$ 时(间距比 $\mu = 5$),仿真流量 Q 随间距的增加近似呈线性规律增加,在间距 $S = 20\text{ mm}$ 时,流量达到了峰值 72.65 mL/min ,当间距 $S > 20\text{ mm}$ 时,泵流量趋于稳定。分析原因认为,随着两个半球缺纵向间距增加至 20 mm 过程中,后者逐渐远离前者遮流影响区,后者对前者的反作用力逐渐消失,前者及后者的正、反向阻力逐渐恢复;其中,圆面对流体的阻力增加要快于球面,因而反、正向流阻差增加显著,至间距为 20 mm 时流阻差增加至最大,因而泵送流体的能力最强;随着间距比的继续增加,绕流两个半球缺的流场恢复成了绕流单个半球缺流场的状态,其正、反向绕流阻力及流阻差值不再变化,因而泵流量趋于稳定。

分析图 5 可知,横向排列的两个半球缺随着间距的增加,仿真流量 Q 降低;至间距接近 20 mm 时,流量趋于稳定。分析原因认为,横向排列的两半球

缺越近,其圆面及球面对流体的阻碍作用越强,同时,间距较小的间隙更加大了对流体的阻碍作用,使正、反向流动的总阻力系数增加较快;由于两个几乎连成一体圆面对流体的阻碍作用显著地强于球面,所以反向流动的阻力及反、正向流阻差增加较快,因而横向间距越小,其泵送流体的能力越强,图中两半球缺在最小间距为 10 mm 时获得了 74.98 mL/min 的输出流量;随着间距比的继续增加,横向排列的两个半球缺对流体的阻力恢复到绕流单个半球缺的阻力状况,因而泵流量趋于稳定。

综合分析图 4 和图 5,发现相同条件下横向排列的半球缺其泵送流体的能力强于纵向。究其原因认为,横向排列能够形成比纵向排列更大的流阻差,因而其获得的泵流量会更大。

3.2 多个半球缺定间距比下对流场的影响

通过以上数值模拟获得了纵向及横向变间距排列的两半球缺对流场及流量的影响规律,为进一步探讨半球缺数量变化对流场及流量的影响,进行定间距 ($S = H = 10\text{ mm}$) 下改变纵向、横向排列半球缺数量 ($1 \sim 4$) 的仿真研究。

3.2.1 多个半球缺纵、横向定间距排列的压强变化

基于 Fluent 软件分别建立纵向及横向排列半球缺数量为 $1 \sim 4$ 个的泵流场有限元模型,在靠近入口管的半球缺球面左侧相距 10 mm 取测试点 P1,在靠近出口管的半球缺圆面右侧相距 10 mm 取测试点 P2,通过对流场内各测试点处压强差(横向排列取各组中全部半球缺测试点的平均值)的分析,以探讨在确定的间距比下,半球缺的数量对流场的影响,其测试点分布如图 6 所示。

对于图 6 中的各测试点,依次从对应泵腔流场

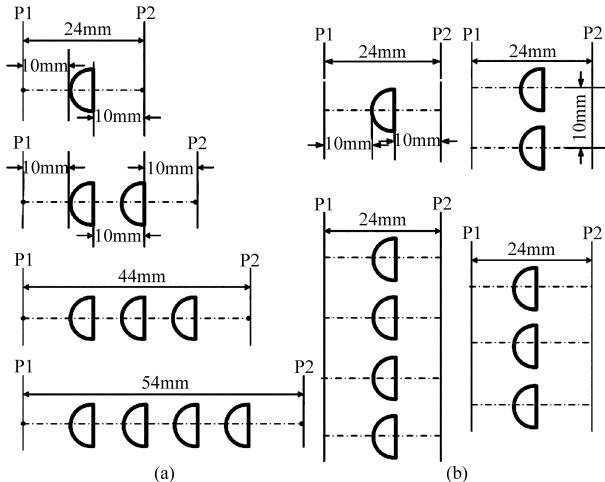


图 6 设置测试点示意图

Fig.6 Set test points

(a) 1~4 个半球缺纵向排列测试点分布

(b) 1~4 个半球缺横向排列测试点分布

的压力云图中提取 P1 和 P2 点处的压强,并计算其压强差 $\Delta p = |p_{P1} + p_{P2}|$,如表 2 所示。

表 2 纵向、横向定间距排列半球缺测试点正、反向压差
Tab.2 Pressure difference of two test points in forward, reverse flow for hemisphere-segments with fixed spacing arranged in longitudinal and transverse directions Pa

半球缺个数	方向	纵向排列	横向排列
1	正向	29 611	29 611
	反向	97 210	97 210
2	正向	195 750	71 097
	反向	211 561	191 561
3	正向	207 917	121 962
	反向	224 391	254 389
4	正向	226 045	156 902
	反向	278 270	290 726

分析表 2 可知,随着纵向、横向排列半球缺数量的增加均会引起 P1 和 P2 点之间压强差的增加,且反向压强差增加的趋势显著地大于正向。分析原因可知:①对横向排列半球缺而言,正向流动时,增加半球缺个数,会因其过水截面减小而引起球面前部的水位涌高,流速降低,压强增大;而背流面处的圆面附近水位降低,并形成较大的漩涡及漩涡迂回现象,消耗了大量能量,压强变低,使半球缺沿流向前后形成较大的压强差,半球缺数量增加的越多,其形成的压强差越大;同样,反向流动时沿流向也会形成压强差,只不过反向流动时圆面作为迎流面对水流的阻挡效果显著强于球面,而其背流面-球面部分形成漩涡的强度要弱于圆面,所以反向流动时形成的压强差大于正向流动,且随着横向排列半球缺数量的逐渐增加,其反向流动压强差增加越显著。②对纵向排列半球缺而言,增加正、反向半球缺的个数,同样会使其过水面积减小,造成前半球缺前部水流的壅水而导致流速降低,压强变大;后面的半球缺因前者的遮挡作用而在半球缺间产生漩涡而消耗能量,压强降低,半球缺前后形成压强差,且半球缺个数增加的越多,其后部压降就越大,因而形成的压强差越大;反向流动时圆面对流体的遮挡效果强于球面,所以反向流动时形成的压强差高于正向流动,且随着半球缺个数的增加,其压强差增加显著。

3.2.2 多个半球缺纵、横向定间距排列对流量的影响

图 7 是仿真流量随纵、横向半球缺数量的变化曲线($S = H = 10\text{ mm}$)。从图中看出,随着纵向、横向排列半球缺个数的增加,泵的仿真流量增加;相同条件下,增加横向排列半球缺的个数能获得更高的泵流量,这与文献[16]的结论相一致。分析原因认

为,综合表 2 可知,随着纵向、横向排列半球缺个数的增加,其反、正向压强差增加,因而反、正向流阻差增加,泵流量增加;并且相同条件下,增加横向排列半球缺的数量,能够获得更大的压强差,因而泵流量更大。

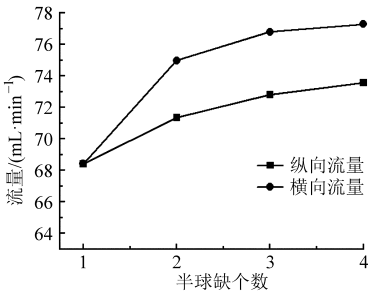


图 7 泵仿真流量随纵向、横向排列半球缺个数的变化曲线

Fig.7 Curve of simulation flow rate varying along with number of hemisphere-segments arranged in longitudinal and transverse directions

4 试验

4.1 半球缺纵、横向排列泵试验流量与仿真流量的比较

泵流量试验样机及试验条件与仿真泵参数及条件一致。泵流量试验装置如图 8 所示,由信号发生器和功率放大器提供驱动电压及频率,由高精度电子秤测试泵流量。试验时的驱动电压及频率分别取 120 V、6 Hz,试验分纵向排列和横向排列两组进行,每一组测试中,均逐次增加半球缺的数量,记录下规定时间内泵的输出流量。

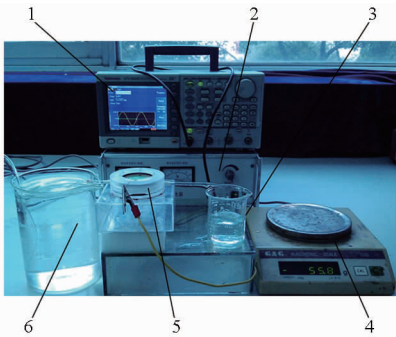


图 8 泵流量测试装置图

Fig.8 Device of pump flow rate experiment

1. 信号发生器 2. 功率放大器 3. 量杯 4. 电子秤 5. 泵样机
6. 储液杯

图 9 和图 10 分别是泵试验流量与仿真流量随纵向和横向排列半球缺数量变化的影响曲线。分析图 9、10 可知,随着半球缺数量的增加,纵向及横向排列的半球缺无阀泵试验流量及仿真流量均增加,二者变化趋势一致,说明上述仿真的分析及结果是正确的。

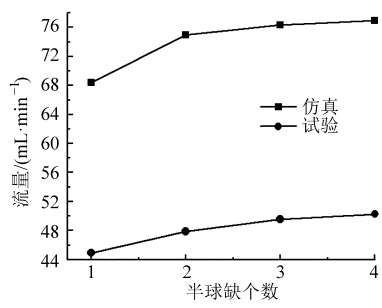


图 9 泵仿真流量与试验流量随横向排列半球缺个数的变化曲线

Fig. 9 Comparison between simulation and experimental flow rate with difference number of hemisphere-segments arranged in transverse

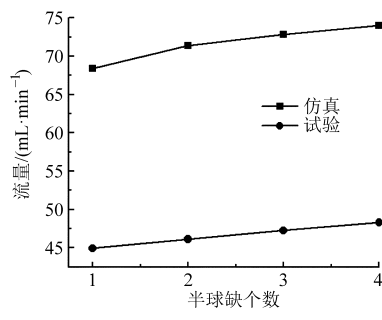


图 10 泵仿真流量与试验流量随纵向排列半球缺个数的变化曲线

Fig. 10 Comparison between simulation and experimental flow rate with difference number of hemisphere-segments arranged in longitudinal direction

4.2 试验结果分析

仿真分析及试验研究表明,在合适的间距范围内,适当增加纵、横向排列半球缺的数量能够显著提高泵流量。同时,研究中也发现,仿真流量与试验流

量间存在较大偏差,其纵向、横向排列的平均偏差分别为 35.10%、34.98%。造成二者偏差较大的原因有:①仿真分析时,设入口压强为恒定值,而试验时入口压强存在一定的波动。②仿真分析时是在理想状态下进行的,而泵流量试验中,泵腔内部结构对流体能量的损耗、漩涡的产生及迂回,均消耗了流体大量的能量,导致试验流量减小。③气穴的产生及游移不可控制,极大地影响了泵的试验流量。④试验环境、振动、噪声、温度、及人为因素对泵流量也会产生不可估量的影响。

5 结论

(1) 通过对半球缺无阀泵理论流量的分析、推导,揭示了该泵具有泵送性能的本质性机理。

(2) 通过对纵向及横向变间距排列的两个半球缺流场及流量的仿真研究,探明了半球缺间距的改变间接改变了球面及圆面对流体的阻力,从而引起反正向流阻差的改变进而影响着泵的输出性能这一规律;获得了减小横向间距、适当增加纵向间距均能提高泵送性能的重要结论。

(3) 通过对定间距下多个半球缺纵、横向排列的流场及泵流量的仿真研究,发现了增加半球缺数量其实是增加了半球缺的圆面及球面对流体流阻差的规律,探寻出了在合适的间距下,增加纵、横向半球缺的数量即能提升泵流量及增加横向半球缺数量更能显著提高泵流量的结论。

(4) 通过相同条件下的泵流量试验,验证了仿真分析结论的正确性;并对仿真流量与试验流量的偏差进行了分析。

参 考 文 献

- 1 刘春景,唐敦兵,何华,等. 滴灌三角形迷宫滴头水力性能稳健性分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 67-72.
Liu Chunjing, Tang Dunbing, He Hua, et al. Hydraulic performance robustness analysis for drip irrigation triangle labyrinth channel of emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 67-72. (in Chinese)
- 2 胡永翔,李援农,张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 87-91.
Hu Yongxiang, Li Yuannong, Zhang Ying. Experiment on crop coefficient and water requirement of drip-irrigation jujube in loess plateau of China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 87-91. (in Chinese)
- 3 冯俊杰,费良军,翟国亮,等. 自适应滴头的控制体受力分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 133-138.
Feng Junjie, Fei Liangjun, Zhai Guoliang, et al. Force analysis of control volume in adaptive drip irrigation emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 133-138. (in Chinese)
- 4 Yildirim G, Agiralioglu N. Linear solution for hydraulic analysis of tapered micro-irrigation laterals [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(1): 78-87.
- 5 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)
- 6 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 Xiaochi, Zhang Jianhui, Xia Qixiao, et al. Influence from length of flexible caudal-fin for caudal-fin-type piezoelectric pump

- [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 167 – 173. (in Chinese)
- 7 Ivano I, Dino A, Arianna M, et al. Modeling and experimental validation of a piezoelectric micropump with novel no-moving-part valves[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 133(1): 128 – 140.
- 8 Foster F K, Bardell R L, Blanchard A P, et al. Micropumps with fixed valves; US,5876187[P]. 1999 – 03 – 02.
- 9 Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Lei Hong, et al. Analysis on flow field of the valve-less piezoelectric pump with two inlets and one outlet and a rotating unsymmetrical slope element[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 25(3): 474 – 483.
- 10 胡笑奇, 张建辉, 黄毅, 等. 仿尾鳍式变截面摆动振子无阀压电叠堆泵的结构设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1334 – 1343.
Hu Xiaoqi, Zhang Jianhui, Huang Yi, et al. Structure design of caudal-fin-type piezoelectric-stack pump with variable cross-section oscillating vibrator [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1334 – 1343. (in Chinese)
- 11 Singhal V, Garimella S, Murthy J. Low Reynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valveless micropumps[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 113(2): 226 – 235.
- 12 何秀华, 张睿, 杨嵩, 等. V 型无阀压电泵的流场分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 218 – 221.
He Xiuhua, Zhang Rui, Zhang Song, et al. Analysis of the flow field of the valveless piezoelectric pump with V-shape tubes [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 218 – 221. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 纪晶, 张建辉, 季瑞南, 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): 1072 – 1079.
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): 1072 – 1079. (in Chinese)
- 15 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)
- 16 纪晶, 胡彩旗. 无阀压电泵流阻测试装置研究[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)
- ~~~~~

(上接第 338 页)

- 17 Miller W T, Glanz F H, Kraft L G. Application of a general learning algorithm to the control of robotic manipulators[J]. International Journal of Robot and Resource, 1987, 6(2): 84 – 98.
- 18 Li Y M, Leong S H. Kinematics control of redundant manipulators using a CMAC neural network combined with a genetic algorithm[J]. Robotica, 2004, 22(6): 611 – 621.
- 19 Zhao X, Hong W, Suo Z. Electromechanical hysteresis and coexistent states in dielectric elastomers [J]. Physical Review B, 2007, 76(13): 134113.
- 20 Martinez-Villalpando E C, Herr H. Agonist-antagonist active knee prosthesis: a preliminary study in level-ground walking[J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2009, 46(3): 361 – 374.
- 21 吴孟, 王化明, 朱银龙, 等. 圆柱形介电弹性体驱动器的试验与分析[J]. 机器人, 2010, 32(6): 754 – 758.
Wu Meng, Wang Huaming, Zhu Yinlong, et al. Experiments and analysis of cylindrical dielectric elastomer actuators[J]. Robot, 2010, 32(6): 754 – 758. (in Chinese)
- 22 Lin C C, Chen F C. Improved CMAC neural network control scheme [J]. Electronics Letters, 1999, 35(2): 157 – 158.
- 23 李慧, 刘星桥, 李景. 异步电动机调速系统自适应辨识的 CMAC-ADRC 算法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 358 – 365.
Li Hui, Liu Xingqiao, Li Jing. CMAC-ADRC algorithm based on adaptive parameter identification for asynchronous motor speed control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 358 – 365. (in Chinese)