

无阀压电泵流阻测试装置研究*

纪晶 胡彩旗

(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 无阀压电泵的泵送性能主要取决于管道系统中的正、反向流阻差值,因而对流阻的测试尤为重要。为此设计了能够实现自动或半自动上水功能的无阀压电泵流阻测试装置,该装置测试液体的流速范围较宽,易于分析、研究流阻作用规律;以半球缺阀为例推导了阻力系数公式;利用新、旧2种测试装置对半球缺阻流体无阀压电泵的流阻进行了测试并计算了泵理论流量,与试验流量的偏差分别为34.38%、117.33%。研究表明:无阀压电泵流阻测试装置极大地提高了流阻测试精度;能够进行流阻测试、分析、泵理论流量计算及试验流量的预测。

关键词: 压电泵 无阀 流阻测试

中图分类号: TH35; TH38 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0322-06

Flow Resistance Testing Device of Valve-less Piezoelectric Pump

Ji Jing Hu Caiqi

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

Abstract: The pumping performance of valve-less piezoelectric mainly depends on the flow resistance difference between forward and reverse directions, so testing flow resistance is particularly important. Flow resistance testing device of valve-less piezoelectric pump was designed which can realize automatic or semi automatic water supply function and the measured flow range was wide. The device can be easily used to analyze and research flow action law. Hemisphere-segment valve was taken as study object and the resistance coefficient formula was derived. Flow resistances were tested respectively by traditional and novel test devices and theoretical pump flow were calculated. The deviations between theoretical and experimental flow rates were 34.38% and 117.33%, respectively. The results showed that the accuracy of flow resistance test was greatly improved by the flow resistance testing device of valve-less piezoelectric pump, which can test and analyze flow resistance, calculate pump theoretical flow and predict experimental flow.

Key words: Piezoelectric pump Valve-less Flow resistance testing

引言

滴灌^[1-2]系统的核心部件为滴水器^[3-4],其是在一定的工作压力下,通过流道或孔口将毛管中水流变成滴状或细流状的装置。无阀压电泵(简称为无阀泵)可根据施加电压或频率控制输出微小流量,因而在水培、节水节能灌溉技术及设备等领域拥有巨大的应用潜力,尤其可作为微型滴灌装置应用于高附加值的经济作物培植及试验室新型作物开发

研究中。

无阀压电泵主要是利用管道或者泵腔的特殊结构或形状,形成无移动部件阀结构,实现流体的单向流动。由于不需要附加驱动电机,能将传统泵的驱动源部分、传动部分及泵体三者合为一体,因而提高了电、机能量转换效率,降低了运动构件的磨损,可实现结构简单、体积小、质量轻、耗能低、无噪声、无电磁干扰。无阀压电泵的无移动部件阀有各种形式,如管道阀类的锥形流管^[5-6]、Y形流管^[7-9]、异

收稿日期: 2014-03-31 修回日期: 2014-04-28

* 国家自然科学基金资助项目(51375227)

作者简介: 纪晶,讲师,博士生,主要从事压电泵结构设计及理论研究,E-mail: qnjijing@163.com

形流管等^[10-11]；腔底阀类的扁锥腔^[12]、波纹腔底等^[13-15]；仿生阀类^[16-18]；阻流体阀类的可旋转嵌块^[19]、半球缺等^[20]。无移动部件阀对正、反向来流沿流动方向上所形成的流阻差直接决定着无阀泵的泵送性能。

由于流场运动的复杂性,工程中的流动阻力问题多采用试验解决。无阀泵的流阻试验是研究无移动部件阀所形成的流阻差及其作用规律的有效方法。本文设计一种适用于各种类型无阀泵流阻测试的试验装置;对无阀泵的流阻测试原理及流阻计算公式进行分析和求解;以半球缺阻流体无阀泵的流阻及泵流量测试为例,对流阻测试装置的应用情况进行试验验证。

1 传统无阀泵流阻测试装置存在的弊端

传统的流阻测试装置示意图如图 1 所示,主要由储液瓶、测试泵、刻度杯或电子秤组成(注:测试中刻度杯和电子秤取一即可)。储液瓶的容积相对于测试泵要大得多,以忽略流阻测试中液位变化对液体流动速度的影响,储液瓶内事先蓄满液体(多用纯净水作为流体介质);测试泵通过泵的入口管与储液瓶底部的出口管相连接,出口管上附有调节阀;刻度杯为透明的可直接读取刻度值的量杯,电子秤的测量精度通常取为 0.1 g 或 0.01 g。流阻测试中,通过调节阀的开度来控制流体流进或流出泵腔的流速,通过测量出指定体积(或质量)的流体流出泵腔所需要的时间,进而计算出流体的流速及阻力系数。

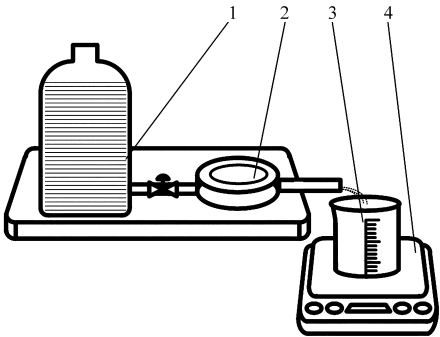


图 1 传统无阀泵用流阻测试装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of flow resistance testing device of traditional valve-less pump

1. 储液瓶 2. 测试泵 3. 刻度杯 4. 电子秤

图 1 所示的流阻测试装置通常存在以下问题：
①储液瓶内液位高度不稳定。尽管储液瓶的容积很大,可是随着试验的进行,瓶内液体逐渐减少,其液位逐渐降低,因而液体的流速降低,直接影响阻力系数的计算结果。
②可测数据点少。由于通过调节阀的开度来控制液体的流速,故其流速调整范围较窄,

因而速度变化区间小,通过计算而得到的阻力系数变化范围较小。
③阻力系数分布区间不均匀。由于速度变化区间小,故可测试的数据点较少,且集中在某一固定区域内,难于分析出阻力系数的作用规律。

2 新型无阀泵流阻测试装置

本文设计了新型无阀泵流阻测试装置,如图 2 所示。其中,水箱通过中间板分隔为蓄水箱(左)和工作水箱(右)两部分,中间板中部设有入水孔。工作水箱侧壁设有出水孔,出水孔通过单向阀与导液管连接;工作水箱中设有控制入水孔启闭的上水组件,包括固定件、浮子杆、挡块和浮子支杆。固定件指密封圈及微浮球或吸盘形密封件,可根据自动上水或半自动上水模式进行不同的选择。入水孔下方设有挡块,用于限制浮子杆的过度下移,以防止试验中不当操作等引起的非正常上水破坏液位的稳定。载物台用于承载待测试无阀泵和刻度杯。工作水箱上方设有溢流阀,以使超过规定液位的液体经溢流阀溢出。水箱支座及载物台均可在空间作 0°~360°旋转,载物台还可沿垂直方向移动,以方便试验时不同高度位置处试验数据的采集。

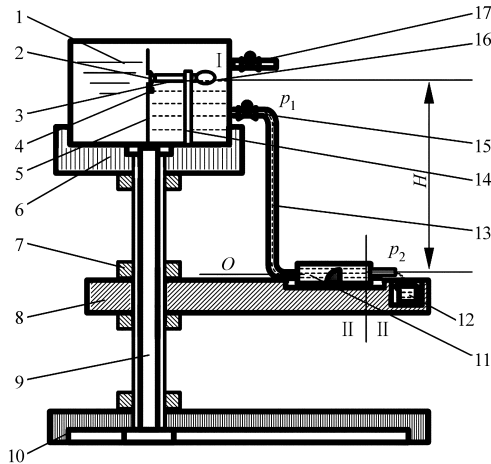


图 2 新型无阀泵用流阻测试装置示意图
Fig.2 Schematic diagram of flow resistance testing device of novel valve-less pump

1. 水箱 2. 固定件(硅胶密封圈及微浮球或吸盘) 3. 浮子杆
4. 挡块 5. 中间板 6. 水箱支座 7. 锁紧螺母 8. 载物台
9. 螺栓 10. 底座 11. 测试泵 12. 刻度杯 13. 导液管 14. 浮子支杆 15. 单向阀 16. 微浮球 17. 溢流阀

新型无阀泵流阻测试装置能够实现 2 种上水功能。当浮子杆左端用硅胶密封圈联接,右端用微浮球联接,适当调整浮子支杆与浮子杆的联结位置,即可实现自动上水,自动上水模式下上水速度不可调;当浮子杆左端用吸盘形密封件联接,右端微浮球可联接亦可不联接,只需调整吸盘形密封件与入水孔贴合面处的贴合面积,即可方便实现上水功能,且上

水速度可调控。吸盘形密封件与入水孔由完全贴合至完全错开的过程中,上水速度由零逐渐变化到最大速度。试验时,可根据试验的出流速度适当调整吸盘与入水孔的贴合面积,以调整上水速度。

3 无阀泵流阻测试原理

半球缺阻流体无阀泵^[19]是一种新型的无阀泵,其形成无移动部件阀的结构是置于泵腔中的阻流体半球缺,如图 3a 所示,这里所谓的半球缺是 1/4 球体。由于其球面和圆面具有对流体不等的阻流特性,能够形成稳定的流阻差,故置于泵腔中就起到了管道阀或腔底阀的作用,能够使泵形成稳定的输出流量。除了通过电压或频率控制流量外,还可通过适当旋转半球缺相对于出入口的角度、有序增加半球缺的个数等方法提高泵的泵送性能,流量的可调控性较好。

图 3b 是半球缺阻流体无阀压电泵结构示意图。图中,因球面对流体的阻力小于圆面对流体的阻力,所以,泵在工作时,经由左入口管流入泵腔的流体多于右出口管流入的流体;由右出口管排出的流体多于左入口管排出的流体,故在泵的一个工作周期内,形成了流体的单向流动。

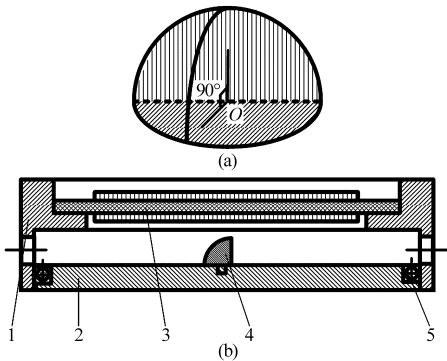


图 3 半球缺及半球缺阻流体无阀泵结构
Fig. 3 Valve-less pump structure of hemisphere-segment and hemisphere-segment bluff-body
(a) 半球缺 (b) 半球缺阻流体无阀泵
1. 泵腔 2. 泵座 3. 压电振子 4. 半球缺 5. O 形密封圈

现以半球缺阻流体无阀泵图 3b 为例,通过分析无阀泵的流阻测试原理,推导出流阻系数计算公式。半球缺流阻系数计算是基于伯努利能量方程、质量守恒方程^[21],计算流体流经半球缺后的水头损失而获得的。参照图 2,取入口管、出口管所在中心平面 $O-O$ 面为基准面;过流断面 I-I 取为工作水箱给定水位自由液面处,距离基准面为 H ;过流断面 II-II 取为距出口管较近处。取过流断面 I-I 和 II-II 之间的流体区域为试验测试段。具有一定势能的恒定均匀水流从工作水箱出口管流入泵腔内,流经测

试段区域,消耗掉一部分水头能量,包括沿程水头损失、局部水头损失和由阻流体半球缺产生的水头损失。

在泵腔内先不放入半球缺的情况下,设流体流经测试段区域消耗的沿程和局部损失水头的和为 h_0 ,则在过流断面 I-I、II-II 处满足总流伯努利方程

$$H + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = 0 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_1^2}{2g} + h_0 \tag{1}$$

其中 p_1, p_2 ——开口容器的自由液面处压力
 v_0 ——自由液面处初始速度,此处视为静止液面,有 $v_0 = 0$
 v_1 ——流体流经泵腔的平均速度
 α_1, α_2 ——动能系数,取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$
式(1)可简化为

$$h_0 = H - \frac{v_1^2}{2g} \tag{2}$$

在泵腔内放入半球缺后,流体分别绕流过半球缺的球面和圆面后会产生不同的水头损失。若流体由入口流入、由出口流出的流动定义为正向流动,简称正流;流体由出口流入、由入口流出的流动定义为反向流动,简称反流。则流体流经测试段区域消耗的沿程和局部水头损失之和仍为 h_0 ,设正向流经半球缺后产生的水头损失为 h_{zh} ,反向流经半球缺后产生的水头损失为 h_f ,则在过流断面 I-I、II-II 处总流伯努利方程可表示为

$$H + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_{zh}^2}{2g} + h_0 + h_{zh} \tag{3}$$

$$H + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_f^2}{2g} + h_0 + h_f \tag{4}$$

式中 v_{zh}, v_f ——流体正向、反向流经半球缺后的平均速度

式(3)、(4)整理为

$$H = \frac{v_{zh}^2}{2g} + h_0 + h_{zh} \tag{5}$$

$$H = \frac{v_f^2}{2g} + h_0 + h_f \tag{6}$$

由式(2)、式(5)、式(6)整理得

$$h_{zh} = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_{zh}^2}{2g} \tag{7}$$

$$h_f = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_f^2}{2g} \tag{8}$$

而半球缺的正向、反向水头损失又可表示为

$$h_{zh} = C_{Dzh} \frac{v_{zh}^2}{2g} \tag{9}$$

$$h_f = C_{Df} \frac{v_f^2}{2g}$$

(10)

式中 C_{Dzh} 、 C_{Df} ——泵腔内的流体沿正向、反向绕流过半球缺时的阻力系数

将式(9)、式(10)代入式(7)、式(8)中,有

$$C_{Dzh} = \frac{v_1^2 - v_{zh}^2}{v_{zh}^2}$$

(11)

$$C_{Df} = \frac{v_1^2 - v_f^2}{v_f^2}$$

(12)

式(11)、(12)即为所求绕流半球缺的正、反向阻力系数 C_{Dzh} 、 C_{Df} 的试验计算式,式中的 v_1 、 v_{zh} 、 v_f 均可通过流阻测试试验计算得出。

流阻测试试验中,测试出不同液面高度 H 处或不同阀门开度时所对应的指定质量流体流经测试段所需时间 Δt ,根据管道流体流量式

$$Q = Av\Delta t$$

(13)

式中 Q ——流体流量

表 1 新旧流阻测试装置测试、计算数据比较

Tab. 1 Comparison between testing and calculating results of new and old flow resistance testing devices

	$\Delta t_0/s$	正流			反流		
		$\Delta t_{zh}/s$	$v_{zh}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	C_{Dzh}	$\Delta t_f/s$	$v_f/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	C_{Df}
传统	61.6	63.19	0.453 6	0.050 1	63.96	0.448 1	0.076 0
新型	56.0	57.35	0.499 7	0.046 8	58.07	0.493 5	0.073 2

从表 1 中看到,具有相同势能的流体,流经 2 种测试装置后,流出相同体积的流体所消耗的时间不同,导致流体流经半球缺后的流速不同,直接导致流阻系数的不同。新型流阻测试装置,由于具有自动或半自动上水功能,能够保证自由液面稳定在固定高度 H 液面处,确保流速的稳定,能够提高测试数据的准确性;传统流阻测试装置自由液面高度 H 随着试验的进行是无常的、实时变化的,使测试点速度波动较大,测试数据不准确。

4.2 泵流量试验验证

在压电振子振动频率为 f 的情况下,压电泵的理论流量 Q_L ^[22] 为

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

(14)

其中

$$\zeta_1 = [1 - a(1 + C_{D1})]^{1/2}/(1 - a + C_{D1})^{1/2}$$

$$\zeta_2 = (1 - a + C_{D2})^{1/2}/[1 - a(1 + C_{D2})]^{1/2}$$

$$a = A_0^2/A^2 \quad C_{D1} = C_{Dzh} \quad C_{D2} = C_{Df}$$

$$\Delta V = 2\pi \int_0^R w_0(1 - r^2/R^2) r dr = \pi w_0 R^2/2$$

(15)

式中 A_0 、 A ——管口截面积与泵腔截面积
 C_{D1} 、 C_{D2} ——正、反向流经半球缺的阻力系数
 ΔV ——压电振子振动的容积变化量^[23]
 r ——压电振子上各点距振子中心距离

A ——管道横截面面积

可计算出不同情况下流体的平均流速 v 。

4 流阻测试试验

4.1 流阻测试试验比较

为比较新、旧 2 种测试装置的测试精度,现以半球缺阻流体无阀压电泵为例,先后利用 2 种测量装置进行流阻测试。试验中,分别调整新、旧 2 种测试装置的水箱和储液瓶中自由液面至泵腔中心水平面的距离 H 为相同高度,此处取为 300 mm,在相同的测试条件下先后利用 2 种测试装置分别对半球缺阻流体无阀泵泵腔内流阻系数进行测试,测试的流体介质为纯净水。试验中需要测试的数据有:无半球缺时流体流经测试区域所需时间 Δt_0 、加半球缺正向、反向流经测试区域所需时间 Δt_{zh} 、 Δt_f 。待测试流体的流量取 Q 为 300 mL,管道的横截面面积 A 为 $3 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ 。测试及计算数据如表 1 所示。

R ——压电振子半径

w_0 ——压电振子中心点的振动幅值

根据式(14)、(15)可得到频率 2 ~ 6 Hz 下新、旧 2 种测试装置对应的泵理论流量 Q_{LX} 、 Q_{LJ} 。试验流量取加载电压 $U = 120 \text{ V}$ 、频率 $f = 2 \sim 6 \text{ Hz}$ 时的试验流量 Q_S 。理论流量与试验流量随频率变化曲线如图 4 所示。

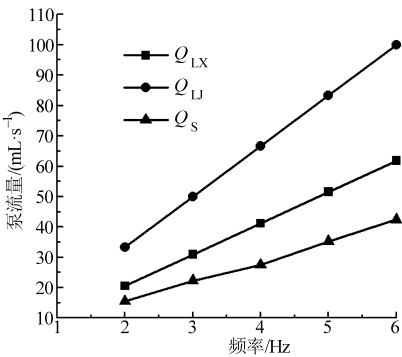


图 4 泵理论及试验流量比较曲线

Fig. 4 Comparison curve between theoretical and experimental flow of pump

分析图 4 可知,泵理论流量与试验流量均随频率增加而增加,二者变化趋势一致;传统流阻测试装置得到的阻力系数对应的泵理论流量 Q_{LJ} 远大于新型流阻测试装置对应的理论泵流量 Q_{LX} ;传统与新

型测试装置对应的理论与试验流量 Q_s 的平均偏差分别为 117.33%、34.38%。分析表明,新型流阻测试装置极大地提高了流阻测试精度,提高了泵理论流量计算精度;可以应用该装置对无阀泵的流阻进行测试、分析,并进行泵理论流量的计算及试验流量的预测;同时,适当调整载物台高度,能够保证测试数据点分布均匀,易于进行流阻作用规律的分析,为无阀泵泵送性能的优化提供有力的理论依据。

尽管新型流阻测试装置提高了流阻测试精度,但其对应的理论流量与试验流量仍然存在较大偏差。其中,对偏差影响较显著的是泵理论流量计算公式。因流场运动的复杂性和瞬变性,至今难以建立工程中实用的流动方程式,对于数学上各种流动问题分析,进行模型的移植、简化是目前常用的处理方式。泵理论流量的推导是将瞬态流模型简化为定常流模型而实现的,而试验中的流态仍是瞬态流,瞬态流容易产生激波、振动、撞击,会消耗大量的能量,这些能量不可逆转的转变成为热量,使沿程机械能不

守恒,直接导致试验流量低于理论流量;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减小泵的试验流量。

5 结论

(1) 基于传统无阀泵流阻测试装置存在的弊端,设计了新型无阀泵流阻测试装置。

(2) 以阻流体阀半球缺为例,分析、推导了无阀泵流阻测试原理及阻力系数计算公式。

(3) 以半球缺阻流体无阀泵为例,利用新、旧 2 种测试装置进行了流体绕流阻力系数测试及泵试验流量验证,经理论流量与试验流量的分析比较可知,利用新型流阻测试装置得到的阻力系数计算的理论流量更接近于试验流量,缩小了与试验流量的偏差。研究表明,新型无阀压电泵流阻测试装置克服了传统装置的弊端,提高了流阻测试精度;所得测试数据能够用来分析及计算泵理论流量,预测泵试验流量。

参 考 文 献

- 1 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)
- 2 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].农业工程学报,2013,29(12):86-92.
Li Jianian, Hong Tiansheng, Ni Huina. Constant pressure water supply automatic device designed for micro-irrigation system based on solar energy [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 86-92. (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 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)
- 5 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.
- 6 Cheng G M, Yang Z G, Zeng P, et al. A piezoelectric pump with new structure[C]//The 76th JSME Fall Annual Meeting, Senne Dai, 1998, V: 247-248.
- 7 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)
- 8 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 valve-less pump with Y-shape tubes [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 136-141. (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 Foster F K, Bardell R L, Blanchard A P, et al. Micropumps with fixed valves: USA, US 5876187[P]. 1999-03-02.
- 11 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)
- 12 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 Chinese)
- 13 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)
- 14 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.
- 15 夏齐霄, 张建辉, 李洪, 等. 非对称坡面底无阀压电泵[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 641 – 647.
Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Li Hong, et al. Valve-less piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 641 – 647. (in Chinese)
- 16 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.
- 17 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)
- 18 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 Xiaoqi, 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)
- 19 南京航空航天大学. 内置可旋转多嵌块无阀压电泵: 中国, ZL 2006 10114526. 8[P]. 2006 – 11 – 14.
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. The piezoelectric valveless pump with multiple rotatable panes inside: China, ZL 2006 10114526. 8[P]. 2006 – 11 – 14. (in Chinese)
- 20 南京航空航天大学. 阻流体阻流无阀压电泵: 中国, 201210396143. X [P]. 2012 – 10 – 18.
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. The piezoelectric valveless pump with identical bluff-body: China, 2012 10396143. X [P]. 2012 – 10 – 18. (in Chinese)
- 21 丁祖荣. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 139 – 150.
- 22 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.
- 23 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)

(上接第 321 页)

- 14 潘中永, 潘希伟, 李小俊, 等. 离心泵泄漏流转子动力学特性分析 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 67 – 71.
Pan Zhongyong, Pan Xiwei, Li Xiaojun, et al. Rotordynamic analysis of leakage flow in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 67 – 71. (in Chinese)
- 15 Wunderlich W O. Hydraulic structures [M]. Reston, VA: ASCE Press, 2004.
- 16 Aki S Y, Abdel R, Ahmed A. Condition monitoring of a single cylinder engine running on gasoline and gasoline-ethanol blend using wear particle analysis technique [C]// ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013, 11: VO11TO6A008 – 1 – 9.
- 17 邴浩, 曹树良, 王玉川. 湍流模型对混流泵性能预测的影响 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 42 – 47.
Bing Hao, Cao Shuliang, Wang Yuchuan. Influence of turbulence model on performance prediction of mixed-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 42 – 47. (in Chinese)
- 18 葛薇, 王少萍. 航空液压泵磨损状况预测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1410 – 1414.
Ge Wei, Wang Shaoping. Wear condition prediction of hydraulic pump [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(11): 1410 – 1414. (in Chinese)
- 19 Wedeven L D, Bourdoulous R. Hydraulic gear pump failure analysis and tribology simulation [M]// Totten G E, Wills D K, Feldmarm D G. Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects, STP1339, 1999: 105 – 118.
- 20 张元勋, 唐倩, 李忠华, 等. 基于流体力学泄漏模型的螺杆泵泄漏机理分析 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 326 – 332, 339.
Zhang Yuanxun, Tang Qian, Li Zhonghua, et al. Leakage mechanism of screw pump based on leakage model in fluid mechanics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 326 – 332, 339. (in Chinese)