

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.049

# 无阀压电泵用椭圆组合管正交优化设计与试验\*

邓志丹<sup>1</sup> 何秀华<sup>2</sup> 杨嵩<sup>2</sup> 李富<sup>2</sup>

(1. 江苏大学理学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了提高无阀压电泵中流管的流阻特性, 提出一种新型椭圆组合管结构。该流管为三通结构, 汇流管是传统扩散/收缩管, 分流管是椭圆曲线结构的扩散/收缩管。通过数值模拟, 应用正交方法优化椭圆组合管的结构参数。设计选用的汇流管最小宽度  $d = 150 \mu\text{m}$ , 流管深度  $H = 150 \mu\text{m}$ , 优化结果表明当进出口压差为 50 kPa 时, 结构尺寸为  $r = 75 \mu\text{m}$ ,  $L = 3\ 000 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 80^\circ$ ,  $a = 1\ 000 \mu\text{m}$ ,  $b = 450 \mu\text{m}$  的椭圆组合管有最高的正反向流阻系数比  $\lambda$ 。通过 MEMS 技术制作出优化后的椭圆组合管并进行试验, 并与数值模拟结果对比。结果表明: 试验值小于模拟值, 压差在 10 ~ 100 kPa 范围内, 正向流量试验值与模拟值最大相差 12.6%, 反向流量两者最大相差 5.3%; 压差为 50 kPa 时, 两者的  $\lambda$  值分别为 1.83 和 1.97, 相差 7.65%。

**关键词:** 压电泵 椭圆组合管 数值模拟 正交试验

**中图分类号:** S277.9; TH38 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0284-05

## Orthogonal Optimization Design and Experiment of Oval Composite Tube in Valveless Piezoelectric Pump

Deng Zhidan<sup>1</sup> He Xiuhua<sup>2</sup> Yang Song<sup>2</sup> Li Fu<sup>2</sup>

(1. Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

2. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to improve the characteristics of flow resistance in the valveless piezoelectric pump, a micro-flow tube called oval composite was presented. It's a kind of three-way tube, of which branch tube was composed of oval nozzle/diffuser elements and converging tube was composed of traditional nozzle/diffuser elements. In the numerical simulation, the orthogonal optimization was applied to obtain parameters of the proposed tube. The minimum width of converging tube  $d$  was  $150 \mu\text{m}$  and the depth of the tube  $H$  was  $150 \mu\text{m}$ . The optimization results showed that when the pressure difference between the inlet and outlet was fixed at 50 kPa, the highest coefficient of positive and negative flow resistance  $\lambda$  was achieved with optimization parameters of  $r = 75 \mu\text{m}$ ,  $L = 3\ 000 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 80^\circ$ ,  $a = 1\ 000 \mu\text{m}$ ,  $b = 450 \mu\text{m}$ . Then, the optimized composite tubes were produced though MEMS processing technology and the experiments were carried out and compared with the numerical simulations. The results showed that the experimental value was less than simulated value with pressure difference of 10 ~ 100 kPa. The positive largest mass flow difference between the experiment and simulation was 12.6%, and the negative was 5.3%. When the pressure difference was 50 kPa,  $\lambda$  was 1.83 (positive) and 1.97 (negative) with difference of 7.65%.

**Key words:** Piezoelectric pump Oval composite tube Numerical simulation Orthogonal test

收稿日期: 2013-03-13 修回日期: 2013-03-31

\* 国家自然科学基金资助项目(51276082)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8号)

作者简介: 邓志丹, 副教授, 主要从事流体机械内部流动及理论研究, E-mail: xiaopingbangyan@sina.com

### 引言

微泵是微流动系统的流体驱动部件,在医疗器械、化学分析、芯片冷却和微量燃料供给等领域具有广阔的应用前景<sup>[1~3]</sup>。无阀压电泵是一种没有可动阀部件的薄膜振动式微泵,具有结构简单、体积小、耗能低、噪声低、无电磁干扰等优点。

无阀压电泵利用流体在特殊结构管道中正反向流阻不同的原理,通过两个方向的流量差异来实现流体的单向输运。由于Y型管<sup>[4]</sup>可以产生不同流动方向的流阻差异,故可用于无阀压电泵,而传统扩散/收缩管可产生较大的不同流动方向流阻差异<sup>[5~6]</sup>,由此二者的结合有可能产生更大的流阻差异。为此本课题组研制出V型流管,将V型管与Y型管的性能进行比较,结果证明V型管有效地提高了管道的不同方向流阻差异<sup>[7~8]</sup>,并对V型管无阀压电泵的性能进行了分析<sup>[9]</sup>。改进V型管的汇流管为传统的扩散/收缩管,设计出三通全扩散/收缩管无阀压电泵<sup>[10]</sup>。研究发现直管三通管结构的内部流动在分流管中易产生分离流动造成损失<sup>[8]</sup>,采用椭圆线的弯曲分流管实现汇流管到分流管光滑过渡,可减小流动分离,降低汇流管到分流管方向的流阻,分流管到汇流管方向的流动则可以通过控制弯曲管路曲率以增大流体对管壁面的冲击损失,提高汇流方向流阻,从而实现两个方向上流阻差异的进一步增大。

本文研究的新型椭圆组合管,其汇流管为传统扩散/收缩管,分流管以椭圆线为轮廓,整体组成对称的平面三通管结构。通过正交设计方法优化椭圆组合管的结构参数,并制作出优化的椭圆组合管进行试验验证,为后续的设计提供依据。

### 1 椭圆组合管无阀压电泵及流管结构

椭圆组合管无阀压电泵<sup>[11]</sup>结构如图1所示,由泵体、泵盖和压电振子3部分组成。泵体上加工有

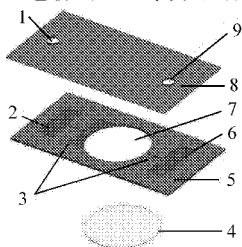


图1 椭圆组合管无阀压电泵结构图

Fig.1 Structure of valveless piezoelectric pump with oval composite tube

- 1. 进口孔 2. 进口腔 3. 椭圆组合管 4. 压电振子 5. 泵体
- 6. 出口腔 7. 泵腔 8. 泵盖 9. 出口孔

泵腔、进(出)口腔和2个椭圆组合管,泵盖上加工有进(出)口腔,泵体与泵盖键合,并将压电振子粘结于泵体泵腔下部,从而完成泵腔、进(出)口腔及流管的密封。椭圆组合管结构如图2所示,为平面三通管结构,包括1个汇流管和2个分流管。汇流管是传统扩散/收缩管,分流管是轮廓为椭圆曲线的扩散/收缩管。其主要参数为:汇流管最小宽度 $d$ ,汇流管长度 $L$ ,锥角 $\theta$ ,圆角半径 $r$ ,分流管截取包角 $\gamma$ ,分流管椭圆长半轴长度 $b$ ,分流管椭圆短半轴长度 $a$ ,流管深度 $H$ 。设流阻小的流动方向为正向,流阻大的流动方向为反向,则椭圆组合管正反向如图2所示。

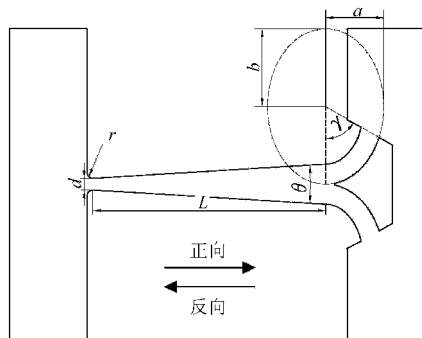


图2 椭圆组合管结构图

Fig.2 Structure of oval composite tube

### 2 椭圆组合管正交优化设计

#### 2.1 正交设计考核指标及正交表选取

采用流管正反向流阻系数比 $\lambda$ <sup>[12]</sup>来衡量流管正反向流阻的不对称性,该系数为反向流阻系数 $\xi_n$ 与正向流阻系数 $\xi_d$ 之比,所以 $\lambda$ 大于1,计算式为

$$\lambda = \frac{\xi_n}{\xi_d} \tag{1}$$

$$\xi_n = \frac{2\Delta p_n}{\rho \bar{v}_n^2} \tag{2}$$

$$\xi_d = \frac{2\Delta p_d}{\rho \bar{v}_d^2} \tag{3}$$

- 式中  $\xi_n$ ——反向流动的阻力系数
- $\xi_d$ ——正向流动的阻力系数
- $\Delta p_n$ ——反向流动的压力损失
- $\Delta p_d$ ——正向流动的压力损失
- $\bar{v}_n$ ——反向流动时最小截面的平均速度
- $\bar{v}_d$ ——正向流动时最小截面的平均速度

若设流动时流管两端压差相等,即 $\Delta p_n = \Delta p_d = \Delta p$ ,则式(1)可变为

$$\lambda = \frac{\xi_n}{\xi_d} = \frac{\bar{v}_d^2}{\bar{v}_n^2} = \frac{\left(\frac{Q_d}{A}\right)^2}{\left(\frac{Q_n}{A}\right)^2} = \left(\frac{Q_d}{Q_n}\right)^2 \tag{4}$$

式中  $Q_d$ ——正向流量  $Q_n$ ——反向流量

$A$ ——汇流管最小截面面积

若正向和反向流动时流管两端压差相同,则  $\lambda$  为正向流量与反向流量之比的平方。通过对无阀压电泵内部压力的研究,选取  $\Delta p = 50$  kPa。

为得到正反向流阻差异(流阻系数  $\lambda$ )较大的流管结构尺寸,应用正交设计<sup>[13]</sup>方法进行流管结构优化,可利用正交表安排试验方案并通过数值模拟形式实施。

为了保证正交试验的准确性和缩短数值模拟的周期,分别对椭圆组合管的汇流管和分流管结构进行正交试验:首先对汇流管结构进行正交设计,然后将优化后的结构参数用于椭圆组合管的正交设计。

椭圆组合管的结构参数如前所述,先选定汇流管最小宽度  $d = 150 \mu\text{m}$ ,并设平面流管深度为  $150 \mu\text{m}$ ,对其余 6 个参数进行优化,即有 6 个影响因素,分别为  $r, L, \theta, a, b, \gamma$ ,对每个因素选取 3 个水平。第 1 次正交设计选取的汇流管因素和水平如表 1 所示,第 2 次正交设计选取的椭圆组合管因素和水平如表 2 所示。两次正交设计都选用  $L_9(3^4)$  正交表,利用该正交表的前 3 列确定方案。

表 1 汇流管因素与水平表

Tab.1 Factor and level of converging tube

水平	因素		
	$R/\mu\text{m}$	$L/\mu\text{m}$	$\theta/(^\circ)$
1	75	1 500	4
2	150	2 250	7
3	300	3 000	10

表 2 椭圆组合管因素与水平表

Tab.2 Factor and level of oval composite tube

水平	因素		
	$\gamma/(^\circ)$	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$
1	40	800	450
2	60	1 000	600
3	80	1 200	750

2.2 数值模拟

椭圆组合管是关于流管中心截面对称的结构,为了节约计算资源和加快计算速度,只需利用流管的一半结构建立计算网格模型,并在对称面上加载对称边界条件进行数值模拟。对压力梯度较大的流场区域,特别是流管进出口处进行网格加密。网格模型如图 3 所示。数值计算使用 SST 湍流模型,该模型对逆压力梯度的预测较为准确,适用于预测边界层各种压力梯度下的分离特性<sup>[14]</sup>。模型进出口的边界条件采用压力进出口,出口静压设为零,对称面上设置对称边界条件,其余壁面设为无滑移边界

条件,流动介质为不可压缩水。

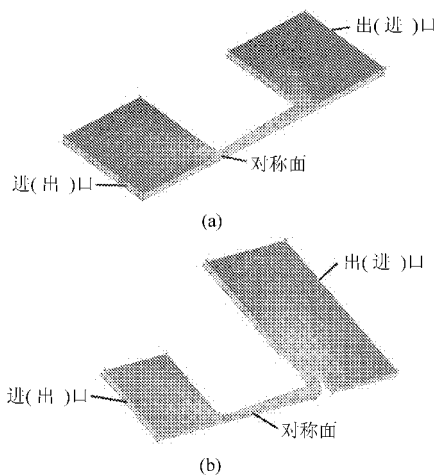


图 3 流管网格

Fig.3 Mesh of tubes

(a) 汇流管 (b) 椭圆组合管

2.3 模拟结果分析

利用表 1 确定的正交试验方案、数值模拟结果及分析如表 3 所示,当  $\Delta p = 50$  kPa 时,各因素的最佳水平分别为: $r = 75 \mu\text{m}, L = 3 000 \mu\text{m}, \theta = 7^\circ$ ,各因素的影响主次顺序为: $L > r > \theta$ 。

表 3 汇流管正交试验方案与结果

Tab.3 Orthogonal test of converging tube

试验管号	$r/\mu\text{m}$	$L/\mu\text{m}$	$\theta/(^\circ)$	$\lambda$
1	75	1 500	4	1.54
2	75	2 250	7	1.69
3	75	3 000	10	1.67
4	150	1 500	7	1.54
5	150	2 250	10	1.53
6	150	3 000	4	1.68
7	300	1 500	10	1.15
8	300	2 250	4	1.56
9	300	3 000	7	1.57
均值 1	1.633	1.410	1.593	
均值 2	1.583	1.593	1.600	
均值 3	1.427	1.640	1.450	
极差	0.206	0.230	0.150	

由于最优组合方案与所给出 9 种方案均不同,需要进一步分析。对该方案的汇流管进行建模和数值模拟,作为第 10 种方案与其余 9 种方案的  $\lambda$  值进行对比,如图 4 所示,该方案的  $\lambda$  值最大,为 1.73。因此,采用该组合方案的结构尺寸设计汇流管并进行椭圆组合管正交设计。利用表 2 确定的 9 种正交试验方案、数值模拟结果及分析如表 4 所示,当  $\Delta p = 50$  kPa 时,各因素的最佳水平分别为: $a = 1 000 \mu\text{m}, b = 450 \mu\text{m}, \gamma = 80^\circ$ ,因素的影响主次顺序为: $a > \gamma > b$ ,该方案即方案 8。优化后的椭圆组合管结构尺寸为: $d = 150 \mu\text{m}, H = 150 \mu\text{m}, r = 75 \mu\text{m}$ ,

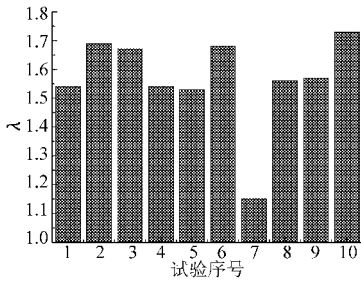


图4 10种组合方案的λ值对比

Fig.4 Comparison of λ at different schemes

$L = 3\ 000\ \mu\text{m}$ ,  $\theta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 80^\circ$ ,  $a = 1\ 000\ \mu\text{m}$ ,  $b = 450\ \mu\text{m}$ 。

图5为压差50 kPa时方案8管内流动中间截面的压力梯度和速度矢量分布。由图可以看出正向流动时,椭圆组合管中压力梯度较小,由于分流管为椭圆结构,过渡光滑,可以抑制漩涡的产生,减小了正向流阻;反向流动时,管中压力梯度较大,由于分流管曲率较大,壁面冲击和对流较强,反向压力损失很大。所以椭圆组合管结构可以提高流管的λ值。

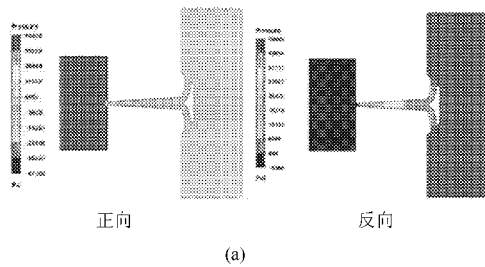


图5 方案8管内流动中间截面压力梯度和速度矢量

Fig.5 Pressure gradient and velocity vector of midsection in scheme 8 tube

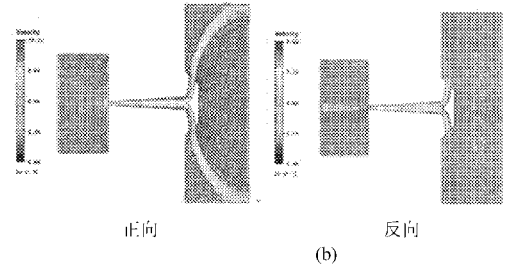
(a) 压力梯度 (b) 速度矢量

由图4和表4可看出,当 $\Delta p = 50\ \text{kPa}$ 时,优化结构椭圆组合管的λ为1.97,说明椭圆组合管结构流管提高了流阻性能。

表4 椭圆组合管正交试验方案与结果

Tab.4 Orthogonal test of oval composite tube

试验序号	$\gamma/(^\circ)$	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$\lambda$
1	40	800	450	1.82
2	40	1 000	600	1.82
3	40	1 200	750	1.80
4	60	800	600	1.79
5	60	1 000	750	1.80
6	60	1 200	450	1.88
7	80	800	750	1.82
8	80	1 000	450	1.97
9	80	1 200	600	1.89
均值1	1.813	1.810	1.890	
均值2	1.823	1.863	1.833	
均值3	1.893	1.857	1.807	
极差	0.080	0.053	0.083	



### 3 试验

#### 3.1 椭圆组合管的制作

椭圆组合管的制作应用MEMS加工技术,使用硅片作为基底,利用深反应离子刻蚀工艺(DIRE)加工出深度为 $150\ \mu\text{m}$ 的微流道和进(出)口腔体,然后通过静电键合技术将Pyrex7740玻璃片与硅片封合,玻璃片上应用激光钻孔技术加工出流管进(出)口。制作完成的椭圆组合管如图6所示。

#### 3.2 试验方案

试验装置如图7所示,可以测量一定压力下流管的流量。驱动压力由高压氮气提供,气源控制装置由1个残气排放阀、3个空气过滤器和1个精密减压阀组成,空气过滤器用来过滤氮气中的杂质颗粒,防止其混入液体堵塞流管,气体压力通过精密减压阀调节。压力容器内装有超纯水,气体压力驱动压力容器里的液体经由三通管流入椭圆组合管。利用在三通管上安置的压力传感器可测量椭圆组合管

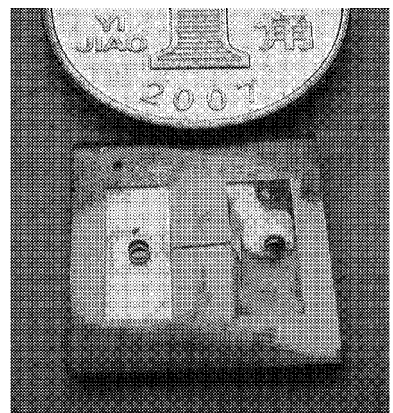


图6 椭圆组合管照片

Fig.6 Photo of oval composite tube

进口处的液体静压,压力传感器由直流稳压电源供电。在给定的压力下,利用滴定管测量一定时间内从椭圆组合管流出的液体体积,即可算出管内流量。

#### 3.3 试验与模拟结果对比

试验选取的压差范围为10 kPa到100 kPa,每隔10 kPa测量一个值,流管正反向流量试验与模拟结



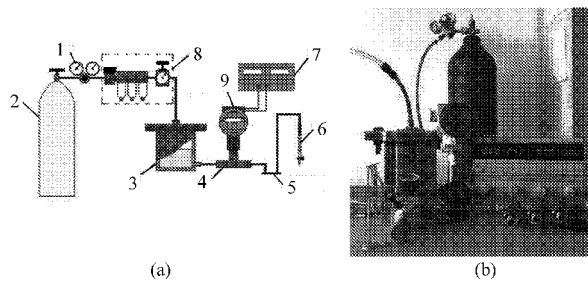


图7 椭圆组合管试验台

Fig. 7 Experimental rig of oval composite tube

(a) 原理图 (b) 实物图

- 1. 分压表 2. 高压氮气瓶 3. 压力容器 4. 三通管 5. 椭圆组合管
- 6. 滴定管 7. 直流稳压电源 8. 气源控制装置 9. 压力传感器

果的对比如图8所示。结果表明:试验值小于模拟值;正向流动压差为40 kPa时,试验值与数值模拟值相差最大,分别为13.4 mL/min和11.9 mL/min,相差12.6%;反向流动压差为100 kPa时,两者相差最大,分别为15.9 mL/min和15.1 mL/min,相差5.30%。由图可以看出,反向流量的预测精度高于正向流量。这是因为正向流动为扩散流动,易发生流动分离,影响了预测精度。

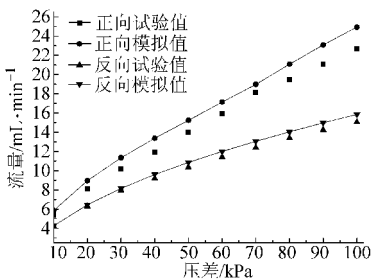


图8 不同压差下流量试验值与模拟值对比

Fig. 8 Mass flow comparison of experiment and simulation results under different pressures

流管λ值试验与模拟结果如图9所示,由图可以看出,在10~40 kPa范围内,试验与模拟相差较大,大于10%,在30 kPa时相差最大,分别为1.93

和1.64,相差17.7%;在50~100 kPa范围内,试验值与模拟值相差较小,小于10%,在90 kPa时相差最大,分别为2.37和2.18,相差8.72%;当压差为50 kPa时,两者的λ值分别为1.83和1.97,相差7.65%。试验验证了流管数值模拟的可行性和有效性。

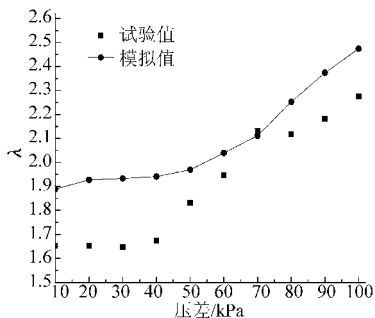


图9 不同压差下λ试验值与模拟值对比

Fig. 9 Comparison of λ in experiment and simulation under different pressures

### 4 结论

(1) 提出一种用于无阀压电泵的新型椭圆组合管,并基于正交设计,采用数值模拟方法对椭圆组合管的6个结构参数进行了优化,得到了最优结构尺寸组合为: $d = 150 \mu\text{m}$ ,  $H = 150 \mu\text{m}$ ,  $r = 75 \mu\text{m}$ ,  $L = 3000 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 7^\circ$ ,  $\gamma = 80^\circ$ ,  $a = 1000 \mu\text{m}$ ,  $b = 450 \mu\text{m}$ 。

(2) 通过MEMS技术制作出椭圆组合管并进行试验,得到压差在10~100 kPa范围内的流管正反向流量,与数值模拟的结果进行对比,结果表明:正向流动试验值与模拟值最大相差12.6%;反向流动时两者最大相差5.30%;两者的λ值在10~40 kPa范围内相差较大;在50~100 kPa范围内相差较小;当压差为50 kPa时,两者的λ值分别为1.83和1.97,相差7.65%。

### 参考文献

- 1 Woias P. Micropumps—past, progress and future prospects [J]. Sensors and Actuator B: Chemical, 2005, 105(1): 28~38.
- 2 Laser D J, Santiago J G. A review of micropump[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14(6): 35~64.
- 3 Liu Guojun, Shen Chuanliang, Yang Zhigang, et al. A disposable piezoelectric micropump with high performance for closed-loop insulin therapy system [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 163(1): 291~296.
- 4 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)
- 5 Stemme E, Stemme G. A valveless diffuser/nozzle based fluid pump [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1993, 39(2): 159~167.
- 6 Vishal Singhal, Suresh V Garimella, Jayathi Y Murthy. Low Reynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valveless micropumps[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 113(2): 226~235.
- 7 何秀华,张睿.“V”形无阀压电泵理论分析与数值模拟[J]. 排灌机械,2008,26(4): 30~34. He Xiuhua, Zhang Rui. Theoretical analysis and numerical simulation of valveless piezoelectric pump with V-shape tube [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(4): 30~34. (in Chinese)

## 参 考 文 献

- 1 周锦进,阿达依·谢尔亚孜旦,安晓刚. 电化学机械加工在碳钢管内孔光整中的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 145~148.  
Zhou Jinjin, Adayi Xieeryazidan, An Xiaogang. Research and application of ECMM in inner surface finishing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 145~148. (in Chinese)
- 2 胡龙飞,刘全坤,王成勇,等. 基于多目标优化的钢管拉拔成形过程设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 161~164.  
Hu Longfei, Liu Quankun, Wang Chengyong, et al. Forming process design of pipe drawing based on multi-objective optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 161~164. (in Chinese)
- 3 Muralikrishnan B, Venkatachalam S. A note on three-point method for roundness measurement [J]. Precision Engineering, 2005, 29(3): 257.
- 4 赵维谦,谭久彬,杨文国,等. 基于两步法超精密圆度仪误差分离系统[J]. 中国机械工程, 2000, 11(11): 1206~1208.  
Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Yang Wenguo, et al. Ultra-precision roundness error separation system based on the two-step separation method[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(11): 1206~1208. (in Chinese)
- 5 赵维谦,谭久彬,常承,等. 超精圆度仪全自动误差分离装置的研制[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(2): 203~205.  
Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Chang Cheng, et al. Development of automatic error separation system for ultra-precision roundness instrument[J]. China Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(2): 203~205. (in Chinese)
- 6 姜丽华. 非接触式实时在线直径测量系统的研究与开发[D]. 大连:大连理工大学,2005.  
Jiang Lihua. Non-contact diameter measurement system real-time online research and development [D]. Dalian: Dalian University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- 7 肖鹏,刘文耀,裘稀石,等. 高抗振性大口径钢管动态直径测量系统[J]. 光电工程, 2012, 39(1): 40~47.  
Xiao Peng, Liu Wenyao, Qiu Xishi, et al. Active anti-vibration system for measuring diameter of steel pipe[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(1): 40~47. (in Chinese)
- 8 王宏,陈庆峰. 基于虚拟仪器的大直径焊管的形位误差检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2008(12): 101~106.  
Wang Hong, Chen Qingfeng. Form and position error measuring system for large dia. welded pipe based on VI[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(12): 101~106. (in Chinese)
- 9 姜晓勇. 钢管测量、称重、喷标系统的研究与开发[D]. 杭州:浙江大学,2003.  
Jiang Xiaoyong. Study & development of steel tube's measure, weight, stencil system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- 10 黄富贵,董兆鹏,崔长彩. 用谐波分析方法识别零件的圆度误差特征[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(8): 8~10.  
Huang Fugui, Dong Zhaopeng, Cui Changcai. Using harmonic analysis method to identify characteristics of roundness error of components [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2011, 30(8): 8~10. (in Chinese)
- 11 张复兴. 关于钢管的圆度[J]. 上海计量测试, 2004, 31(1): 21~22.  
Zhang Fuxing. About pipe circularity[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2004, 31(1): 21~22. (in Chinese)
- 12 蒋新松. 机器人学导论[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1993.

~~~~~

(上接第 288 页)

- 8 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)
- 9 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.
- 10 何秀华,王健,杨嵩,等. 三通全扩散/收缩管无阀压电泵的流阻性能[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(6): 497~501.  
He Xiuhua, Wang Jian, Yang Song, et al. Flow resistance characteristics of valveless piezoelectric pump with three-way diffuser/nozzle tube[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(6): 497~501. (in Chinese)
- 11 何秀华. 椭圆组合管无阀压电泵:中国, 201010505904.1 [P]. 2012-07-04.  
He Xiuhua. Valveless piezoelectric pump with oval composite tubes; CN, 201010505904.1 [P]. 2012-07-04. (in Chinese)
- 12 李军,吴博达,程光明,等. 收缩管/扩张管型无阀压电泵的工作原理[J]. 压电与声光,2000,22(6): 376~378.  
Li Jun, Wu Boda, Cheng Guangming, et al. The principle of diffuser/nozzle based valveless piezoelectric pump[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000,22(6): 376~378. (in Chinese)
- 13 陈魁. 试验设计与分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2005: 108~121.
- 14 白兰. 基于 MEMS 的无阀压电泵数值仿真与实验研究[D]. 长春:中国科学院长春精密机械与物理研究所,2005.  
Bai Lan. Simulations and experimental studies of valve-less micropumps based on MEMS [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)