基于正交设计法的“V”形管优化设计

何秀华, 张 睿, 杨 嵩, 邓许连
(江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 基于无阀压电泵中扩散/渐缩管流动特性,提出一种新型“V”形管.为了获得“V”形管最佳的流阻性能,对“V”形管的结构参数进行优化设计.基于正交设计法,采用有限元仿真的试验方法,设计了一个四因素三水平的正交方案,并对仿真试验所获得的数据进行极差分析,得到了各几何参数对“V”形管流阻系数影响的主次顺序,同时获得较合理的新方案.通过进行再设计和分析,并与正交方案进行对比,最终验证了新方案是最优方案,为“V”形管无阀压电泵的优化设计提供了一定的参考.

关键词: 无阀压电泵; “V”形管; 流阻系数; 正交设计法; 优化设计
中图分类号: TH38 文献标志码: A 文章编号: 1005-6254(2008)05-0014-04

Optimization design of V-shape tube based on orthogonal design

HE Xiu-hua, ZHANG Rui, YANG Song, DENG Xu-lian
(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Based on the flow characteristic of diffuser/nozzle in valveless piezoelectric pump, a new type of V-shape tube is presented. In order to acquire the optimum characteristic of flow resistance of the V-shape tube, it is essential to optimize its structural parameters. Based on the orthogonal design method, and by using the finite element simulation, a four-factor and three-level orthogonal scheme was put forward. The data was analyzed through simulating experiment and the order of the influencing factors to the flow resistance of V-shape tube was obtained. Meanwhile, a relatively new reasonable scheme was gained. By redesigning, analyzing, and comparing with that from orthogonal scheme, the new scheme was proved to be more advantageous.

Key words: valveless piezoelectric pump; V-shape tube; flow resistance coefficient; orthogonal design; optimization design

基于压电驱动技术的无阀压电泵[1,2],具有结构简单,易集成,体积小,质量轻,噪声小,无电磁干扰,以及输出流量易控制等优点,成为微泵[3]的研究热点.新型“V”形管无阀压电泵[4]改进了传统方式的扩散/渐缩管压电泵和三通管压电泵的不足,可应用于生物芯片、微流控芯片、微型全分析系统以及临床药物微量输液系统等领域.

无阀压电泵是依靠流体正反方向上通过其无活动部件阀结构的流阻不同,而产生正反方向的流量差对流体输送的.因此,无活动部件阀的流阻系数影响着无阀压电泵的流量[5]和工作效率[6].为提高“V”形管无阀压电泵的流量和工作效率,很有必要研究“V”形管的结构参数对其流阻性能的影响,从而优化“V”形管的结构.

正交设计法[7]是常规的优化设计方法,能科学地安排与分析多因素组合,通过选择一部分有代表

收稿日期: 2008-07-18
基金项目: 江苏省高校自然科学研究计划项目(04KJB470026)
作者简介: 何秀华(1961—),女,四川成都人,副教授(zldeng@ujs.edu.cn),主要从事流体机械内部流动及性能的研究.
张 睿(1984—),男,山东济宁人,硕士研究生(gulie1984@163.com),主要从事流体机械内部流动及性能的研究.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性的试验方案, 利用得到的模拟或试验数据, 分析影响因素中的主次因素与结果指标的关系, 最终得到最佳组合方案.

本研究基于正交设计法, 通过采用有限元模拟试验的方法对“V”形管的结构进行优化, 确定“V”形管的结构参数对其流阻性能影响的主次, 获得模拟范围内的最优组合.

1　泵结构及影响因素分析

1.1　“V”形管无阀压电泵结构

图 1所示的是“V”形管无阀压电泵的结构图, 主要包括泵体、压电振子、进出口阀、固定片和固定螺钉, 其中, 进出口管采用的是互相倒置的“V”形管. “V”形管包括 2个分流管以及 1个合流管, 其中分流管是关于“V”形管中心对称的 2个扩散管路, 交汇于合流管 3.

进口阀为正“V”形, 两分流管与泵腔相连, 合流管与外接管路相连; 出口阀为倒“V”形, 合流管与泵腔相连, 两分流管与外接管路相连. “V”形管的平面结构示意图参见文献[4].

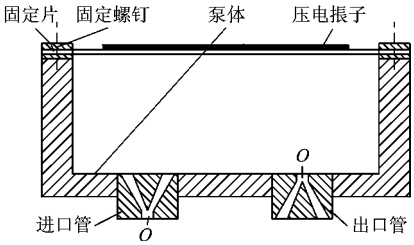


图 1　“V”形管无阀压电泵结构图

Fig. 1　Draft of piezoelectric pump with V-shape tube

1.2　影响因素的确定

“V”形管的结构参数主要包括: 总长度 a, 合流管宽度 b, 长度 c, 分流角 θ, 扩散角 φ以及“V”形管深度 h(采用平面式结构). 由于合流管的长度以及扩散管的长度的改变主要影响管路的沿程损失, 同时“V”形管结构尺寸小, 流体在其内部流动的损失主要是由于流动突变引起的局部阻力损失[8], 因此, 影响“V”形管流阻特性的结构因素主要包括 b, φ, θ以及 h.

2　正交优化设计

2.1　理论基础

正交设计法是利用正交表来科学安排试验方案、并对试验结果进行计算、分析的数学方法. 所谓正交表, 是以拉丁方为基础将待处理的数据按 $L_\alpha(\beta^\gamma)$编制成的表格, 其中 L 代表拉丁方, α表示试验次数, γ表示试验因子数, β表示因子的水平数. 正交表的主要特点是使试验设计的因子和水平均匀搭配、均衡分布, 各因子和水平的组合既不遗漏, 也不重复. 这样, 仅用少量的试验即可基本反映全面试验, 这正是试验优化所追求的主要目标.

2.2　正交试验方案的确立

根据前面的分析, 选择因素水平如表 1所示, 对于每个因子选用 3个水平数. 由于因素数是 4, 因此选用 $L_9(3^4)$正交表. 而确定试验方案如表 2.

其中, 对于合流管宽度 b, 采用 A 表示, 选用 3个水平: 0.12, 0.15和 0.18 mm; 对于扩散角 φ, 采用 B 表示, 选用的 3个水平分别为: 10°, 15°, 20°; 对于分流角 θ, 采用 C 表示, 选用的 3个水平也分别为: 10°, 15°, 20°; 最后, 对于“V”形管深度 h, 采用 D 表示, 选用的 3个水平分别为 0.04, 0.06和 0.08 mm.

表 1　正交设计因素水平表

Tab. 1　Factors and levels of orthogonal design

水平	因素			
	A	B	C	D
1	0.12	10	10	0.04
2	0.15	15	15	0.06
3	0.18	20	20	0.08

表 2　正交设计方案表

Tab. 2　Scheme of orthogonal design

方案号	A	B	C	D
1	A_1	B_1	C_1	D_1
2	A_1	B_2	C_2	D_2
3	A_1	B_3	C_3	D_3
4	A_2	B_1	C_2	D_3
5	A_2	B_2	C_3	D_1
6	A_2	B_3	C_1	D_2
7	A_3	B_1	C_3	D_2
8	A_3	B_2	C_1	D_3
9	A_3	B_3	C_2	D_1

2.3　正交优化分析的考核指标

无阀压电泵的瞬时流量计算公式以及效率公式分别为

$$q = \frac{2V_X}{T}\frac{\sqrt{\lambda}-1}{\sqrt{\lambda}+1} \qquad (1)$$

$$\eta = \frac{V_T}{2V_X} = \frac{\sqrt{\lambda}-1}{\sqrt{\lambda}+1} \qquad (2)$$

式中 V_X 是由压电振子振动变形所引起的泵腔的体积变化的幅值, T 为压电振子的振动周期, V_T 为 1个周期 T 内的总流量, λ为无阀压电泵流阻系数, 且

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\lambda = \frac{\xi_f}{\xi} \quad (3)$$

式中 ξ 和 ξ_f 分别为流体在“V”形管中正反方向流动的压力损失系数分别为

$$\xi_z = \frac{2\Delta p_z}{\rho v_z^2} \quad (4)$$

$$\xi_f = \frac{2\Delta p_f}{\rho v_f^2} \quad (5)$$

式中 ρ 为流体的密度, v_z 和 v_f 分别为流体通过进出口管的截面 O 处的平均速度, Δp_z 和 Δp_f 分别是“V”形管正反方向流动的压力损失, 压电泵进出口与外界大气相通, 则 $\Delta p_z = \Delta p_f$.

通过式 (1) 和式 (2) 可知, 在不改变压电振子的前提下, 泵的流量和效率随流阻系数 λ 的增大而增大. 因此, 流阻系数 λ 作为研究的考核指标[4].

3 数值模拟计算

3.1 “V”形管有限元模型的建立及边界条件

利用 ANSYS/FLOTRAN, 选用 FLUID142单元建立三维“V”形管有限元模型, 由于“V”形管结构较为复杂, 采用自由划分的方法, 对模型进行网格划分, 其中网格从管的两端往中间分流处逐渐变密. 图2所示的是“V”形管的有限元模型示意图.

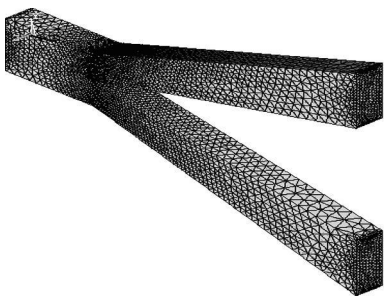


图 2 有限元网格

Fig. 2 Mesh of finite element

在分析过程中, 选用水为流体介质, 密度 $\rho = 1\,000\ kg/m^3$, 动力粘度系数 $\mu = 1.01 \times 10^{-3}\ N \cdot s/m^2$. 压力边界条件为: 进口相对压力为 10 kPa, 出口与大气相通, 固壁采用无滑移速度边界条件.

3.2 结果分析

通过仿真试验分析, 最终得到正交方案的流阻系数 λ 分布 (如图 3所示). 由图 3可知, 方案 8得到的 λ 值最大, 而方案 1得到的 λ 值最小.

通过初步对正交方案进行仿真试验, 得出方案8较其他方案得到的 λ 值大, 但方案 8是否就是最优方案还有待进一步的分析.

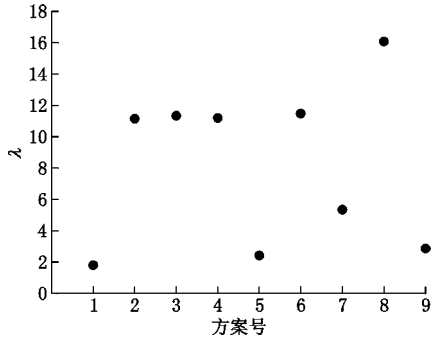


图 3 正交方案流阻系数分布

Fig. 3 Contrast of flow resistance coefficient

3.3 极差分析

极差分析法是处理正交试验结果数据的一种方法, 它通过计算产品质量考核指标的极差值, 找出最优的组合方案. 极差分析的意义在于: 极差值越大, 说明该因素的水平变化对质量指标的影响程度就越大, 即该因素越重要; 反之, 极差值越小, 该因素越不重要. 从而可以根据极差的大小顺序排列出因素对质量指标影响的主次顺序, 同时也可得出最优组合方案. 在分析过程中, 若最优组合方案不是最初的组合方案, 应对新的组合方案进行再设计, 并与原有组合方案对比、验证. 表 3给出了各影响因素对“V”形管流阻系数 λ 的极差 R 分析表.

表 3 “V”形管流阻系数极差分析表

Tab. 3 Range analysis of flow resistance coefficient of V-shape tube

指标平均值	A	B	C	D
K_{1j}	8.098	6.115	9.790	2.369
K_{2j}	8.365	9.884	8.404	9.322
K_{3j}	8.100	8.564	6.370	12.873
R	0.267	3.769	3.420	10.504

由表 3可以判断出各影响因素对压电振子中心点处振幅影响的主次顺序为 $D > B > C > A$. (即厚度 h > 扩散角 φ > 分流角 θ > 合流管宽度 b). 根据指标平均值 (K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}) 的大小, 得到最优方案为 $A_2 B_2 C_1 D_3$.

4 再设计与分析

按 K_{1j}, K_{2j}, K_{3j} 数值大小, 可确定对于不同质量指标、各因素的最佳水平组合. 根据极差分析得到“V”形管结构方案 $A_2 B_2 C_1 D_3$, 它不属于正交设计表内组合方案, 因此有必要对其进行再设计, 利用 ANSYS软件对其进行模拟分析. 图 4、图 5分别为流

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

体在“V”形管内正反方向流动时的压力分布图.

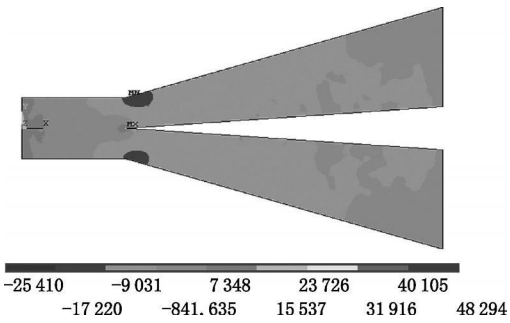


图 4 “V”形管正向压力云图

Fig 4 Pressure contours of positive flow in V- shape tube

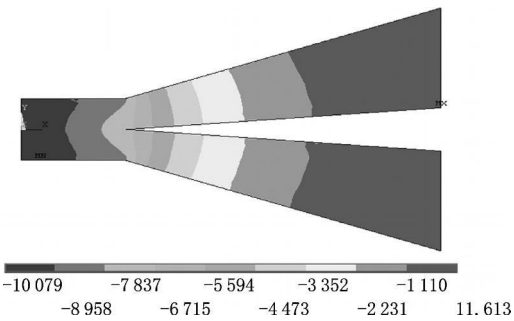


图 5 “V”形管反向压力云图

Fig 5 Pressure contours of negative flow in V- shape tube

图 6为合流管进 (正向)出 (反向)口上速度分布图. 由图可知流体在“V”形管中正向速度明显大于反向速度, 从而形成流量差, 实现流体单向流动.

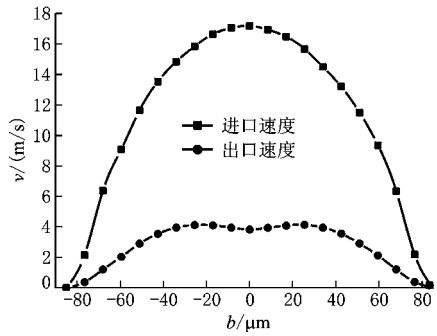


图 6 “V”形管中合流管正反向速度分布图

Fig 6 Tachograph of positive and negative in confluent tube

通过模拟计算得到的数据, 最终得到最优方案 $A_2B_2C_1D_3$的流阻系数 λ值. 图 7所示的是最优方案(10号)与正交方案的流阻系数 λ值的对比图.

由图 7可知, 方案 $A_2B_2C_1D_3$的 λ值大于正交方案中的所有 λ值, 这说明方案 $A_2B_2C_1D_3$最优, 即合流管进口宽度 b= 0.15 mm, 扩散角 φ= 15°, 分流角 θ= 10°, 深度 h= 0.08 mm时, “V”形管的流阻系数 λ值最大.

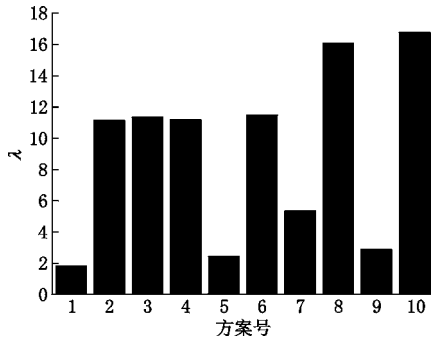


图 7 新方案与正交方案的流阻系数对比图

Fig 7 Contrast of flow resistance coefficient in different schemes

5 结 论

利用正交设计方法, 结合有限元模拟, 以“V”形管的流阻系数 λ作为研究目标对“V”形管的结构参数(合流管宽度、扩散角、分流角以及“V”形管深度)进行了优化. 根据正交设计数据处理的结果, 得到如下结论:

1) 影响“V”形管流阻系数的主次因素依次为“V”形管深度、扩散角、分流角、合流管宽度.

2) 通过极差分析以及再设计分析得到的最优方案是 $A_2B_2C_1D_3$, 即合流管进口宽度 b= 0.15 mm, 扩散角 φ= 15°, 分流角 θ= 10°, 深度 h= 0.08 mm时, “V”形管的流阻系数 λ值最大.

参考文献 (References)

[1] Stemme E, Stemme G. A valve-less diffuser/nozzle based fluid pump [J]. *Sensors and Actuators A*, 1993, 39(12): 159-167.

[2] 何秀华, 张 睿, 蒋权英. 基于 MEMS的压电泵及其研究进展 [J]. 排灌机械, 2007, 25(4): 64-68.
HE Xiu-hua, ZHANG Rui, JIANG Quan-ying. Progress on piezoelectric micropump based on MEMS [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(4): 64-68. (in Chinese)

[3] Woias P. Micropumps—past, progress and future prospects [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, 105: 28-38.

[4] 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): 30-33.
HE Xiu-hua, ZHANG Rui. Theoretical analysis and numerical simulation of a valveless piezoelectric pump with V-shape tube [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(4): 30-33. (in Chinese)

(下转第 22页)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

径向力的影响程度,为离心泵水力设计和优化提供参考依据.

参考文献(References)

[1] Kaechele T, Hauff C, Aschenbrenner T. Discussion of several numerical approaches for the stator-rotor interaction[C]// *Proceedings of the 20th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*. Charlotte, North Carolina, U. S. A., August 2000.

[2] 郭鹏程,罗兴锜,刘胜柱. 离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维紊流数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 1-5.
GUO Peng-cheng, LUO Xing-qi, LIU Sheng-zhu. Numerical simulation of 3D turbulent flow fields through a centrifugal pump including impeller and volute casing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(8): 1-5. (in Chinese)

[3] 朱红耕,袁寿其,刘厚林,等. 大型泵站虹吸式出水流道三维湍流数值计算[J]. 扬州大学学报:自然科学版, 2005, 8(2): 74-78.
ZHU Hong-geng, YUAN Shou-qi, LIU Hou-lin, et al. Numerical computation of the three-dimensional turbulent flow in siphon outlet conduit of large pumping stations[J]. *Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition*, 2005, 8(2): 74-78. (in Chinese)

[4] Speziale C G, Thangam S. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1992, 30(10): 1379-1388.

[5] Xu Jiangrong, Yao Qiang, Cao Xingyu, et al. Algebraic stress model with RNG ε-equation for simulating confined strongly swirling turbulent flows[J]. *Journal of Thermal Science*, 2001, 10(1): 14-19.

[6] 李 玲,李玉梁. 应用基于RNG方法的湍流模型数值模拟钝体绕流流动[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 357-361.
LI Ling, LI Yu-liang. Numerical simulation of turbulent flow around bluff bodies using the RNG $k-\varepsilon$ turbulent model[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(4): 357-361. (in Chinese)

[7] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004

[8] Asuaje M, Bakir F, Kouidri S, et al. Numerical modelization of the flow in centrifugal pump: volute influence in velocity and pressure fields[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2005, 2005(3): 244-255.

[9] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社, 1995.

(责任编辑 张文涛)

(上接第 17页)

[5] Hou Wensheng, Zheng Xiaolin, Das Biswajit, et al. Simulation of the fluidic features for diffuser/nozzle involved in a PZT-based valveless micropump[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(1): 1-4.

[6] Cui Qifeng, Liu Chengliang, Zha Xuan F. Simulation and optimization of a piezoelectric micropump for medical applications[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 36(5-6): 516-524.

[7] 曾小华,王庆年,王伟华,等. 正交优化设计理论在混合动力汽车设计中的应用[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 26-28.
ZENG Xiao-hua, WANG Qing-nian, WANG Wei-hua, et al. Orthogonal optimization design for hybrid electric vehicle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(5): 26-28. (in Chinese)

[8] Pan L S, Ng T Y, Liu G R, et al. Analytical solutions for the dynamic analysis of a valveless micropump—a fluid-membrane coupling study[J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, 93: 173-181.

(责任编辑 赵 鸥)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net