

单腔单振子压电泵流量自测量方法研究^{*}

孙业明^{1,2} 曾平¹ 程光明¹ 黄合成¹

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 东北电力大学机械工程学院, 吉林 132012)

摘要: 为满足压电泵系统流体精确控制及小型化的需要,提出利用压电自感知及神经网络技术的单腔单振子压电泵流量自测量方法。压电泵结构上采用双压电晶片振子同时作为执行元件与传感元件使用。首先分析了流量影响因素,并分析了传感压电片输出信号与振子变形关系。得出:压电泵流量与振子振动状态存在函数关系,振子的振动状态可由传感压电信号实时反映,因此在信号中隐含着压电泵流量信息。据此制作了传感压电信号参数测量电路样机,将参数测量结果作为神经网络输入,建立了用于压电泵流量预测的BP神经网络模型。实验结果表明:利用该方法得到的预测值与实验测量值之间相关系数在0.9993以上,最大相对误差率小于3.46%,预测结果与测量值接近。该流量自测量方法具有较好的准确性。

关键词: 压电泵 流量 测量 自感知 神经网络

中图分类号: O482.41; TK313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0327-06

引言

压电泵是近年来开发出的一种新型泵,是压电驱动器的一个分支。压电泵利用压电振子产生的双向弯曲变形,使泵腔体积和压力大小交替变化,在单向截止阀的配合下,实现流体的定向运动。压电泵具有体积小、结构简单、控制容易、无电磁干扰等特点^[1-5]。

压电泵可用于化学分析、药物注射、喷墨打印、发动机燃料供给等方面^[6-10],在这些应用中,流量的精确测量、控制具有重要意义。流量测量可采用外接流量计,但压电泵属于微小型泵,驱动力弱,流量微小,适合的流量计种类很少,成本较高,并且构成的整个流体控制系统也存在结构复杂、体积较大等缺点。

压电材料是一种智能材料,可实现机械能—电能的相互转换,系统中压电材料同时作为传感器和驱动器,称为自感知执行器。近年来,压电材料的自感知功能在许多方面得到应用^[11-16],这为压电泵流量的测量提供了一个新的思路。

本文提出一种利用压电自感知功能的单腔单振子压电泵流量测量方法。压电泵在结构上采用双压电晶片振子,振子中传感压电片输出的电信号中隐含着流量信息。设计了传感信号参数测量电路,将测量的结果送入神经网络,进行流量预测,从而实现压电

泵流量自测量。提出的方法使压电泵省去了外部流量计,并且有望与压电泵的控制系統融合在一起,实现液体输送流量及体积的精确控制。

1 传感压电片感知压电泵流量原理

1.1 压电泵流量分析

对于单腔单振子压电泵,流量由以下参数决定:液体粘度 μ 、密度 ρ 、泵腔高 h 、泵腔半径 r_1 、振子半径 r_2 、阀半径 r_3 、振子振动频率 f 、振幅 A 、出口入口压差 Δp 、振子与阀的相位差 α 等。根据流体力学 π 定理有

$$\frac{q_v}{h^3 f \rho} = F\left(\frac{\mu}{h^2 f \rho}, \frac{r_1}{h}, \frac{A}{h}, \frac{r_2}{h}, \frac{\Delta p}{h^2 f^2 \rho}, \frac{r_3}{h}, \alpha\right) \quad (1)$$

泵结构确定,参数 h 、 r_1 、 r_2 、 r_3 随之确定,流体介质确定时, μ 、 ρ 也确定, α 与阀材质及振子频率有关。因此,式(1)可以简化为

$$q_v = h^3 f \rho F_1\left(\frac{\mu}{h^2 f \rho}, \frac{A}{h}\right) \quad (2)$$

可知当工作流体、泵结构、压差 Δp 确定时,压电泵流量 q_v 由振子振动强度 A 、振动频率 f 决定。

1.2 传感压电信号与振子变形关系分析

两压电(陶瓷)片正对着粘贴在金属基板两侧,构成双压电晶片振子,结构如图1所示。压电泵采用昆山攀特电陶科技有限公司生产的圆形双压电晶

收稿日期: 2013-10-12 修回日期: 2013-11-12
^{*} 教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金资助项目(708028)
作者简介: 孙业明, 博士生, 东北电力大学讲师, 主要从事压电执行器机构设计及驱动控制技术研究, E-mail: 790005813@qq.com
通讯作者: 曾平, 教授, 博士生导师, 主要从事机械设计理论、压电驱动技术研究, E-mail: zengping321@163.com

片振子,直径 55 mm,金属基板为铍青铜材质,金属基板及两侧压电陶瓷晶片厚度均为 0.3 mm。振子上层压电片作为执行元件使用,下层压电片作为传感元件使用。

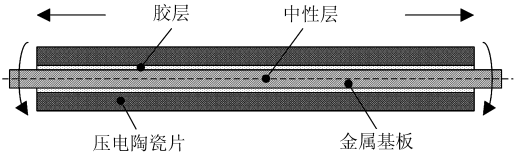


图 1 双压电晶片振子结构图

Fig. 1 Structure of piezoelectric bimorph vibrator

当执行压电片上施加电场时,压电片沿径向伸长或缩短,但金属基板有保持原有尺寸的趋势,因此振子产生向上或向下的弯曲。振子向上或向下弯曲时对下层的传感压电片在径向方向上有拉伸或压缩作用。对传感压电片有^[17]

$$D_3 = d_{31} T_1 + d_{32} T_2 \tag{3}$$

式中 D_3 ——电位移,在 MKSQ 制中,其值等于电极面上的电荷密度

d_{31} 、 d_{32} ——压电常数

T_1 、 T_2 ——垂直于极化方向上的应力,对圆形压电陶瓷,若到圆心距离相等,有

$$T_1 = T_2$$

传感压电片开路电压

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{D_3 S}{C} = \frac{D_3}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{d_{31} T_1 + d_{32} T_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{2 d_{31} T_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \tag{4}$$

式中 Q ——电荷总量 C ——电容

S ——传感压电陶瓷片面积

ε_0 ——介电常数 ε_r ——相对介电常数

事实上,传感压电片在极化方向上应变不相等,电位移也不相等,为简化分析在此考虑的是平均值。

压电振子振幅越大,传感压电片所受应力也越大。设压电泵工作中传感压电片受到的应力为 $T_1 = T_0 \sin(2\pi ft + \varphi)$,则传感压电片的输出(传感压电信号)为

$$U = \frac{2 d_{31}}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} T_0 \sin(2\pi ft + \varphi) \tag{5}$$

可知传感压电信号反映压电振子的振动强弱、振动频率信息。

综上,压电泵流量由振子振动强度及频率决定,振子的振动状态可由传感压电信号反映,因此信号中隐含着压电泵流量信息。

2 用于压电泵流量预测的神经网络

传感压电信号与泵的流量对应关系明确,但非常复杂,求出两者间数学关系表达式有较大难度。

神经网络具有很强的非线性函数逼近能力。利

用神经网络,将反映振子振动状态的传感压电信号信息作为神经网络输入,将泵流量作为输出,两者建立数学联系,从而根据传感压电片输出的电信号准确预测泵的流量,实现压电泵流量自测量。本文使用 BP 神经网络。

2.1 神经网络输入参数选择

为了较好表达传感压电信号特征,又使电路尽量简单,选择输入到神经网络中的信号特征参数为电压参量和频率。

电压参量为

$$\mu_{|u(t)|} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \tag{6}$$

构造的电压参量表示传感压电信号在一定时间内电压幅值的平均值,用来描述振子振动强弱。该参量的选择考虑了传感压电信号的实际特征:在大多情况下,为等幅正弦交流信号;但在某些频率、幅值下,相邻两周期的幅值不相等,呈现大小交替或幅值渐变的状态。该参量统计了传感压电信号每个周期幅值的贡献,受噪声干扰的影响小,输出稳定。

另外,振子振动频率与压电泵的输出性能关系密切,是影响泵输出流量的重要参数。传感压电信号频率与压电振子的振动频率相同,其值可通过电路准确测量。

2.2 传感压电信号参数测量电路

为了从传感压电片中得到神经网络所需的电压参量 $\mu_{|u(t)|}$ 及频率 f 信息,设计了传感压电信号参数测量电路,电路框图如图 2 所示。

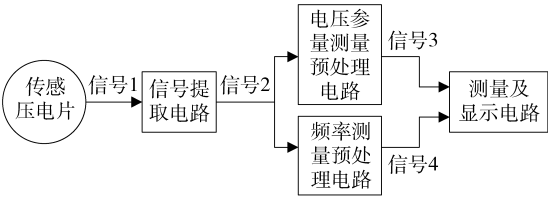


图 2 传感压电信号参数测量电路框图

Fig. 2 Diagram of parameter measurement circuit

2.2.1 信号提取电路

信号提取电路的作用是从传感压电片中提取出反映振子振动状态信息的模拟信号,电路如图 3 所示。

信号提取电路由电压跟随器、滤波电路、比例放大电路构成。压电陶瓷作为传感元件使用,输出电阻很大,若后接电路输入电阻不够大,电路的输出会非常微弱甚至得不到输出。因此在电压跟随器中使用高输入阻抗运算放大器 TL082,输入电阻可达 $10^{12} \Omega$,可有效地从压电片中提取信号。

传感压电信号(信号 1)中含有高频噪声,通过 LM324、R13、L11 组成的低通滤波器去除其中的高频噪声,保留有用信息。

0.02,训练步数为2 000步,显示训练结果的间隔参数为20,设置动量项系数为0.95。

3 实验

3.1 系统搭建

对于文中提出的利用压电振子自感知功能及神经网络预测泵流量的方法,通过实验验证其有效性。

实验装置原理如图7所示,主要实验设备有计算机、NI数据采集卡、7085功率放大器、时间继电器、电子秤、温度计等。计算机在Labview环境下,由NI数据采集卡产生正弦波形,经7085功率放大器进行信号放大作为电源驱动压电泵。压电泵尺寸为60 mm×60 mm。

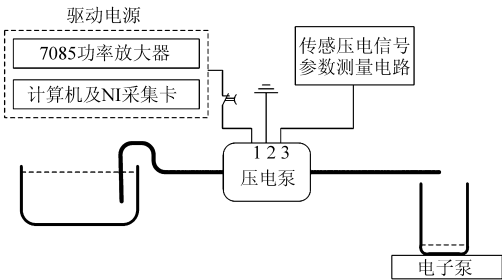


图7 实验装置原理图

制作的传感压电信号参数测量电路样机如图8所示。

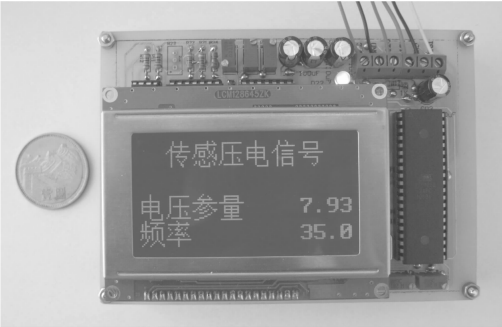


图8 参数测量电路样机

压电泵有3个接线端:电源输入端1、传感压电信号输出端3、接地端2。从输出端3出来的信号送入图8所示电路。

流量值通过称量一定时间内泵输出液体的质量得到,由时间继电器产生定时,由精密电子秤称量液体质量。精密电子秤最小分辨率为0.1 g,相当于液体体积0.1 mL。压电泵工作中,气泡、温度对输出流量有一定影响,需排除或稳定这些因素。

3.2 电压参量、频率、流量关系测试

设定压电泵驱动频率为2.5、5、⋯、70 Hz,频率间隔为2.5 Hz,在每种频率下,设置驱动电压为10、20、⋯、120 V,记录每种条件下驱动电压、流量 q_v 、电

压参量 $\mu_{(1u(t))}$ 及频率 f ,共得到336组数据样本。
因实验数据量较大,无法一一列举,随机选取15 Hz频率下,电压参量-驱动电压及流量-驱动电压关系曲线如图9所示。两曲线对比可知,随驱动电压增大,电压参量及泵流量均增大,两者变化趋势相同。这与“振子振动越强,泵流量越大”的经验相符。

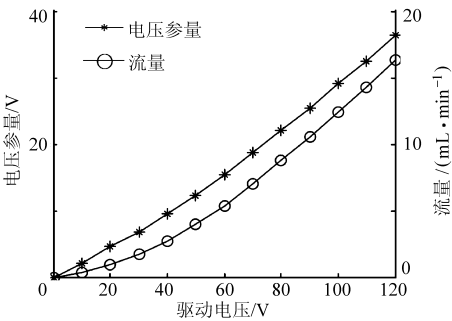


图9 电压参量、流量与驱动电压关系曲线

Fig.9 Relation curves of voltage parameter and flow vs driving voltage

图10为驱动电压为80 V时,电压参量-频率及流量-频率关系曲线。从低频开始,在较大的频率范围内,电压参量及流量有着相同增减趋势,甚至电压参量的大小,在一定程度上可反映泵流量的大小。在频率稍大范围内,电压参量大小无明显变化,但流量随频率增加缓慢上升,此时频率为影响流量的主要因素。频率继续增大,流量开始减小,这是由于频率上升,橡胶阀开启响应明显滞后,不利于流量的提高。

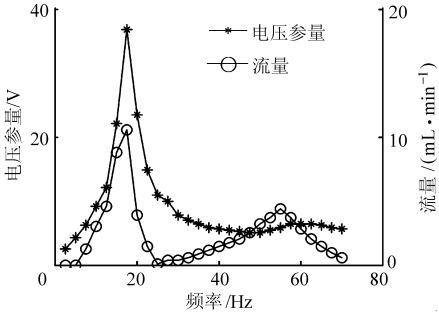


图10 电压参量、流量与频率关系曲线

Fig.10 Relation curves of voltage parameter and flow vs driving frequency

从图9、10可看出,电压参量、频率与泵流量存在明显的对应关系。利用电压参量、频率信息预测压电泵流量会有良好的效果。

3.3 利用传感信号信息与神经网络的流量预测方法

以电压参量 $\mu_{(1u(t))}$ 、频率 f 作为神经网络输入,流量 q_v 作为神经网络输出,构建用于预测压电泵流量的神经网络1。经过训练,神经网络获得正确的

输入输出响应行为,流量 q_v 与传感信号电压参量 $\mu_{|u(t)|}$ 、频率 f 建立数学联系。

同时以驱动电压、频率作为输入,流量作为输出,构建神经网络2,用于与神经网络1预测效果进行比较。

336组数据样本中,取其中298组作为训练样本,其余数据作为检验样本。BP神经网络的建模、训练及仿真利用Matlab神经网络工具箱完成。

图11为频率17.5 Hz、42.5 Hz、67.5 Hz下(均为未参加训练样本),两个不同的神经网络得到的流量预测值与实际测量值之间的曲线对比。其中预

测值1为神经网络1得到的预测结果。预测值2为神经网络2得到的结果。

由图可见,预测值1与流量实测值吻合较好;预测值2与流量实测值则相差较大,尤其是频率为17.5 Hz下的预测误差更为明显。这是因为:该频率位于随电源频率增大泵输出流量由增大变为减小的拐点附近,此时传感压电信号的电压参量也由增大变为减小,两者趋势相同,所以预测结果准确;而以压电泵驱动电压、频率为输入的神经网络2,在此处样本未经训练的情况下,无法预知这一变化趋势,所以误差较大。

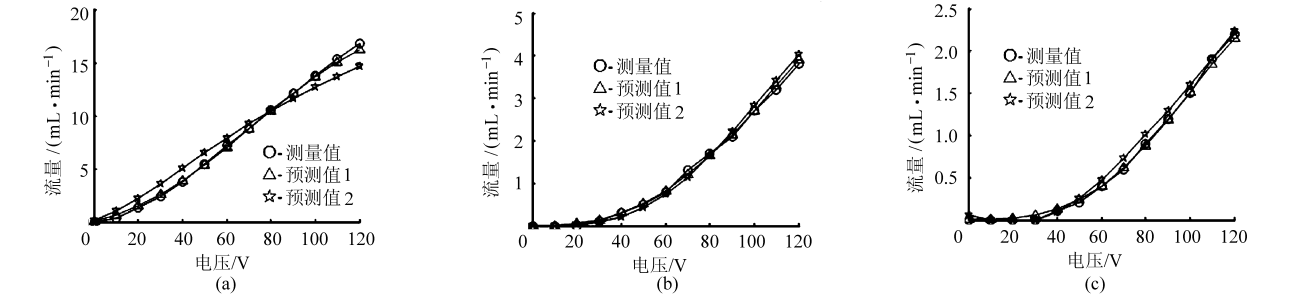


图 11 预测值与实验测量值对比
Fig. 11 Comparison of predicted data and experimental data
(a) $f=17.5\text{ Hz}$ (b) $f=42.5\text{ Hz}$ (c) $f=67.5\text{ Hz}$

表1给出了3种频率下,两个不同的神经网络预测值与实测值之间的相关系数及最大相对误差。相关系数1代表预测值1与实测值的相关系数,最大相对误差1代表预测值1与实测值的最大相对误差。可见,预测值1与实测值相关系数在0.9993以上,最大相对误差小于3.46%。

表 1 预测性能比较

参数	频率/Hz		
	17.5	42.5	67.5
相关系数1	0.999 7	0.999 3	0.999 7
相关系数2	0.993 4	0.998 4	0.998 3
最大相对误差 1/%	3.46	2.93	2.78
最大相对误差 2/%	12.89	6.11	5.70

图10及表1数据表明,以传感压电信号电压参量 $\mu_{|u(t)|}$ 、频率 f 为输入的神经网络1能够更加准

确、有效地预测压电泵输出流量,可作为压电泵的流量预测模型。

4 结论

(1) 在分析流量影响因素及传感压电信号与振子变形关系基础上,得出在传感压电信号中隐含着压电泵流量信息。据此提出了一种利用压电自感知及神经网络的压电泵流量自测量方法。

(2) 设计制作了用于流量自测量的传感压电信号参数测量电路样机,并构造了用于压电泵流量预测的BP神经网络模型,该神经网络以电压参量 $\mu_{|u(t)|}$ 、频率 f 作为输入参数,得到流量的预测值。实验结果表明预测值与实验测量值之间的相关系数在0.9993以上,最大相对误差率小于3.46%。该流量自测量方法具有较好的准确性。

参 考 文 献

1 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)

2 程光明,何丽鹏,曾平,等. 圆形双振子式主动阀压电泵设计与性能实验 [J]. 农业机械学报,2010,41(5):204-208.
Cheng Guangming, He Lipeng, Zeng Ping, et al. Design and performance test on circular two piezoelectric pump with active valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 204-208. (in Chinese)

3 温建明,曾平,胡雄海,等. 三腔蠕动式主动阀压电泵设计与实验研究 [J]. 西安交通大学学报,2010,44(9):78-81.
Wen Jianming, Zeng Ping, Hu Xionghai, et al. Design and experiment of inchworm active valve piezoelectric pump with three chambers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(9): 78-81. (in Chinese)

- 4 王淑云, 阚君武, 沈黄桥, 等. 五腔串联压电泵的设计制作与实验 [J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10(5): 406 – 411.
Wang Shuyun, Kan Junwu, Shen Huangqiao, et al. Design, fabrication and test of serial-connection 5-chamber piezoelectric pump [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012, 10(5): 406 – 411. (in Chinese)
- 5 郑伟, 董景石, 于洪洋, 等. 单振子气体压电泵研究 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 226 – 229.
Zheng Wei, Dong Jingshi, Yu Hongyang, et al. Kipp oscillator gas piezoelectric pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 226 – 229.
- 6 姜德龙, 程光明, 孙晓锋, 等. 输送流体双腔并联压电泵性能分析与试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 82 – 85.
Jiang Delong, Cheng Guangming, Sun Xiaofeng, et al. Performance analysis and experimental study on delivery fluid of double-chamber piezoelectric pump in parallel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3): 82 – 85. (in Chinese)
- 7 吴越, 杨志刚, 刘勇, 等. 压电振子对压电泵极限输出压力影响研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 73 – 78.
Wu Yue, Yang Zhigang, Liu Yong, et al. Effect of piezoelectric actuators on ultimate pressure of piezo-pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(4): 73 – 78. (in Chinese)
- 8 刘勇, 杨志刚, 张德军, 等. 单腔单阀压电喷流泵 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 263 – 265.
Liu Yong, Yang Zhigang, Zhang Dejun, et al. Single-chamber piezoelectric jet pump with single check-valve [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(12): 263 – 265. (in Chinese)
- 9 孔祥冰, 陈立国, 邵超, 等. 面向微量试剂分配的压电叠堆泵 [J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(1): 33 – 38.
Kong Xiangbing, Chen Liguang, Shao Chao, et al. Piezoelectric-stack pump for micro-reagents dispense [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 9(1): 33 – 38. (in Chinese)
- 10 彭太江, 杨志刚, 程光明, 等. 双腔体压电泵的设计 [J]. 光学·精密工程, 2009, 17(5): 1078 – 1085.
Peng Taijiang, Yang Zhigang, Cheng Guangming, et al. Design of double-chamber piezoelectric pump [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1078 – 1085. (in Chinese)
- 11 Ikeda H, Morita T. High-precision positioning using a self-sensing piezoelectric actuator control with a differential detection method [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 170(1–2): 147 – 155.
- 12 史丽萍, 孙立宁, 荣伟彬. 一次逆、二次正压电效应在自感知执行器上的应用 [J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 8(3): 211 – 214.
Shi Liping, Sun Lining, Rong Weibin. Application of the first inverse and the secondary direct piezoelectric effect to self-sensing actuators [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2010, 8(3): 211 – 214. (in Chinese)
- 13 张忠华, 孙宝元, 钱敏, 等. 基于多次压电效应的自感知执行器研究 [J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(5): 677 – 681.
- 14 崔玉国, 董维杰, 高长银, 等. 压电微动工作台的位移自感知控制 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 159 – 164.
Cui Yuguo, Dong Weijie, Gao Changyin, et al. Displacement control of piezoceramic micro-motion worktable using self-sensing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 159 – 164. (in Chinese)
- 15 崔玉国, 董维杰, 孙宝元, 等. 基于积分器的压电陶瓷自感知执行器研究 [J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(6): 845 – 850.
- 16 董维杰, 贾艳丽, 杨明刚. 基于分时复用压电自感知执行器的悬臂梁振动主动控制研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 150 – 153.
- 17 李远, 秦自楷, 周志刚. 压电陶瓷与铁电材料的测量 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 16 – 18.

Flow Self-measurement Method for Single Chamber and Single Vibrator Piezoelectric Pump

Sun Yeming^{1,2} Zeng Ping¹ Cheng Guangming¹ Huang Hecheng¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. College of Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Aiming at the accurate fluid control and the miniaturization of piezoelectric pump system, a flow self-measurement method for single chamber and single vibrator piezoelectric pump was proposed based on piezoelectric self-sensing and neural network. A bimorph vibrator was applied in piezoelectric pump acting as actuator and sensor simultaneously. Firstly, the influencing factors of flow were analyzed using the pi theorem of hydromechanics. Secondly, the relationship between sensing piezoelectric signal and deformation of the vibrator was studied. Then, the information of flow implicit in the sensing piezoelectric signal was found. Thus, a prototype of the parameter measurement circuit for sensing piezoelectric signal was made, and a BP neural network model for flow prediction was constructed by using the parameters acquired from the circuit as the input vector. Experimental results show that the correlation coefficient between the predicted data and the measured data is above 0.999 3, and the maximum relative error is less than 3.46%. the results of prediction are close to the actual data. The method proposed for flow self-measurement has a good accuracy.

Key words: Piezoelectric pump Flow Measurement Self-sensing Neural network