

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.02.002

采用步进电机的微流控芯片气压驱动 系统压力特性研究*

朱鋆峰,王进贤,李松晶*

(哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对目前气动微流控芯片控制系统微型化集成化的需求,提出了一种采用步进电机的微流控芯片气压驱动系统,通过控制器信号驱动步进电机,使PDMS流道产生了形变从而改变了阀口开度,实现了气体容腔的压力控制,对微阀的流量和气体容腔的压力进行了分析,采用Simulink搭建非线性模块,建立了系统的仿真模型,对系统的压力特性进行了仿真,得到了在不同的步进电机阶跃信号作用下的气压驱动系统压力的动态响应特性,并搭建了试验平台进行了验证。结果表明:试验结果与仿真结果基本吻合,该系统能够较快地响应于气压容器,阀口开度越大,气体容器的压力上升越快,稳定压力越高。

关键词:微流控芯片气压驱动系统;步进电机;压力特性;Simulink 仿真

中图分类号:TH137;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)02-0110-05

Pressure characteristics of pneumatic microfluidic chip system driven by stepper motor

ZHU Yun-feng, WANG Jin-xian, LI Song-jing

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the request of miniaturization and integration of microfluidic chip, a pneumatic microfluidic chip system driven by a stepper motor was presented. A controller signal was sent to the stepper motor, and the valve opening was changed by deforming the PDMS channel. The simulation model was built by using Simulink nonlinear module after analyzing the flow rate of the micro valve and the pressure of the gas container. The pressure dynamic response characteristics of the pneumatic microfluidic chip system on different step signal of the stepper motor were given based on simulation. The pressure characteristic test curves of the gas container were obtained and compared with the simulation results by building a test platform. The results indicate that pressure characteristics of pneumatic microfluidic chip system through experiment are basically the same with the simulation results. The response of system is quick to the pressure cavity. When the valve opening is larger, the pressure of the gas container rises more quickly and higher.

Key words: pneumatic microfluidic chip system; stepper motor; pressure characteristic; Simulink

0 引 言

微流控芯片是一种将成千上百的微流道集成于数平方厘米的芯片上,从而实现生化领域所涉及的样本制备、过程反应、分离筛选、检测等功能的芯片,又被称为芯片实验室,曾被美国 Business2.0 杂志誉为“改变

未来的七种技术”之一^[1-2]。其特点在于可用极少量的试剂有效地完成各类实验,取代常规的生化实验平台^[3-6]。微流控芯片利用PDMS和有机玻璃等材料通过软刻蚀方式进行封装,通过气动微流道中气体压力变化来驱动气动微流道与液体微流道之间PDMS薄膜产生形变^[7-8],从而控制液体微流道的通断和样品输

收稿日期:2016-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175101)

作者简介:朱鋆峰(1989-),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事流体控制及自动方向的研究。E-mail:zhuyunfeng1988@126.com

通信联系人:李松晶,女,博士,教授。E-mail:lisongjing@hit.edu.cn

送,具有制备容易、控制方式简单以及易于实现大规模集成的特点。Quake 课题组曾实现了上千个微阀和几百个反应器在微流控芯片上的大规模集成^[9],成为微流控芯片领域一项重要的技术突破。

目前,微流控系统流体控制技术分为两类:

(1)片外流体驱动。即直接由外部流量设备来控制微流控芯片的充液流量,包括蠕动泵、注射泵和压力驱动流量设备3类,流量控制精度较高,得到广泛使用^[10],但体积均较大,难以实现小型化;

(2)片上流体驱动。即在微流控芯片上集成微阀或微泵,例如多阀协调控制、微型压电泵、微型蠕动泵、微型电渗泵等,通过控制阀口开度,开关频率和开关顺序等实现流量驱动实现流量驱动^[11]。片上流量驱动设备可实现与微流控芯片的集成,但流量控制精度不高,且流量调节范围有限^[12]。

随着微流控芯片的不断发展和广泛应用,对其微型化集成化经济性等要求也越来越高。针对目前气动微流控芯片控制系统的需求,本研究基于压力驱动液体流量的原理,结合 PDMS 的弹性与微型步进电机的良好位移特性和控制精度^[13],提出一种采用步进电机的微流控芯片气压驱动系统,并对该气压驱动系统的压力特性进行研究。笔者采用步进电机的微流控芯片气压驱动系统,通过步进电机控制阀口开度,流量控制精度高、控制范围广。同时,通过结合微流控芯片的快速成型技术设计制作,大大减小系统整体体积,便于将来实现微流控芯片外部设备与微流控芯片的集成化与小型化。

1 结构与工作原理

采用步进电机的微流控芯片气压驱动系统由供气源、微阀、步进电机、管道、气液作用装置、传感器、控制电路等组成,控制对象为微流控芯片。其工作原理如图1所示。

气压源可以是空压机、罐装氮气,甚至是小型气泵。进气微阀用于进气节流,串接于进气前向通道中;泄气微阀用于泄压,旁接于前向通道。气体管道连接气压源、微阀、气液作用装置和大气。待驱动液体预先被装进气液作用装置。从气液作用装置流出的液体经流量传感器后对微流控芯片进行充液,充液过程完成后液体向外排至废液池。系统控制电路包括控制器、步进电机驱动器及 AD 模块。步进电机驱动器驱动微阀阀芯产生位移,AD 模块采集压力信号并记录在计算机内,控制器内置程序控制步进电机的脉冲数量及频率。

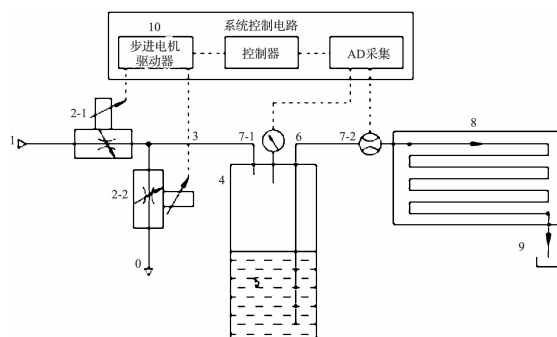


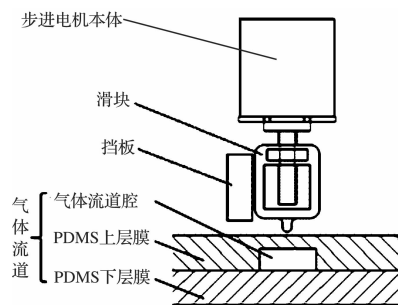
图1 采用步进电机的微流控芯片气压驱动系统控制原理

1-供气源;2-1-进气微阀;2-2-泄气微阀;3-气体管道;4-气液作用装置;5-待驱动液体;6-液体管道;7-1-气体压力传感器;7-2-液体流量传感器;8-微流控芯片;9-废液池;10-控制电路

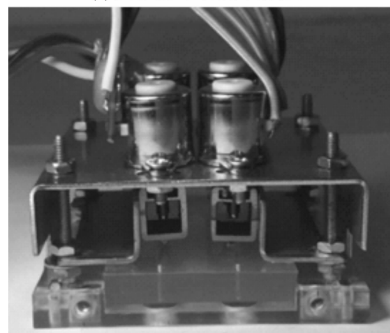
微流控芯片气压驱动系统原理:设定微阀阀口开度,经过控制器算法处理后,向步进电机驱动器提供驱动信号,驱动两个微阀协同动作,改变微阀开度,控制进入气液作用装置中气体量,实现对气体容腔的压力调节。压力气体挤压液体向微流控芯片进行充注。

系统中压力气体流动路径为:“气体管道→进气微阀→气体管道→气体容腔”和“气体管道→进气微阀→泄气微阀→大气”,待驱动液体流动路径为:“气液作用容器→液体管道→微流控芯片→废液池”。在气体流动过程中,气体流经的管道长度不变,且气体的粘度系数小,故在流动过程中造成的压力损失忽略不计。

微阀结构如图2所示。



(a) 步进电机驱动微阀结构图



(b) 微阀实物图

图2 微阀结构原理图

丝母与滑块阀芯固定,当步进电机主轴旋转时,在挡板作用下,带动滑块阀芯沿电机主轴方向上、下运动,

并直接作用于 PDMS 流道接触,从而改变阀口开度。

2 仿真模型建立与结果

2.1 建立数学模型

微阀的气体流动过程十分复杂,本研究采用收缩喷管的质量流量方程,即由 Sanville 流量公式可得进气和泄气微阀的质量流量 q_1 和 q_2 分别为:

$$q_1 = \begin{cases} A_1 p_s \sqrt{\frac{k}{RT_s} \cdot \frac{2}{k-1}} \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{p}{p_s}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_s}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right)} & b \leq \frac{p}{p_s} \leq 1 \\ A_1 p_s \sqrt{\frac{2k}{RT_s(k+1)}} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} & 0 \leq \frac{p}{p_s} < b \end{cases} \quad (1)$$

$$q_2 = \begin{cases} A_2 p \sqrt{\frac{k}{RT} \cdot \frac{2}{k-1}} \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right)} & b \leq \frac{p_0}{p} \leq 1 \\ A_2 p \sqrt{\frac{2k}{RT(k+1)}} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} & 0 \leq \frac{p_0}{p} < b \end{cases} \quad (2)$$

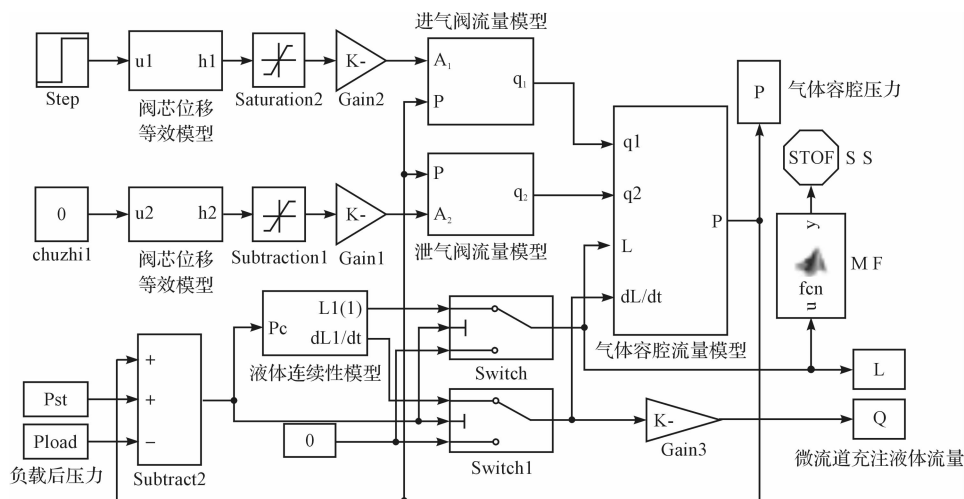


图3 采用步进电机的微流控芯片气压驱动系统模型

2.3 仿真分析

本研究根据流体模型建立微流控芯片气压驱动系统的开环仿真模型。气源压力为 0.15 MPa,微流控芯片工作介质为去离子水,微流控芯片充液流道为矩形定长的直流道,气体流道的尺寸为高度 50 μm 、宽度 100 μm 。

本研究在气压驱动容腔压力动态特性仿真中,分别取 0.6 倍、0.8 倍和 1 倍的阀口开度阶跃信号,仿真结果如图 4 所示。

仿真结果显示不同阀口开度阶跃信号作用下,气体容器压力达到稳态的响应时间不同,随着阀口开度的增大,气体容腔的压力变化速率增大,在更短的时间内达到稳态压力。在阀口开度达到 60% 时,压力动态

式中: A_1, A_2 —进气和排气微阀的阀口面积; T_s —供气源的温度; T —气体容腔的温度; p —气体容腔的压力; p_s —供气源压力; R —气体等熵指数。

对于气体容腔的压力变化,由质量守恒和完全气体状态方程可得:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k}{V_0 + \frac{1}{4}\pi D^2 x} \cdot \left(RT \cdot (q_1 - q_2) - p \cdot \frac{1}{4}\pi D^2 \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (3)$$

式中: x —气体容腔的体积变化的高度, D —气体容腔的直径, V_0 — t_0 时气体容腔的初始体积。

2.2 建立仿真模型

本研究采用 Simulink 搭建非线性模块建立系统的仿真模型。对于阀芯位移模型,采用变换性模型替代,对系统的仿真特性基本没有影响。笔者根据建立的数学模型,搭建系统仿真模型如图 3 所示。

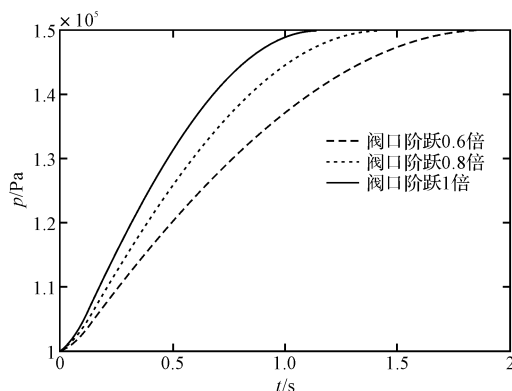
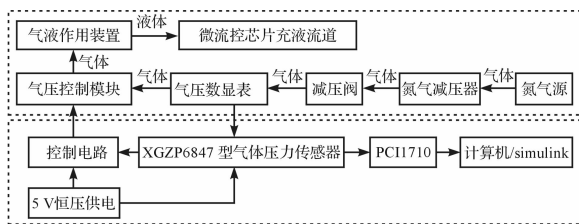


图4 不同阀口阶跃下的压力特性

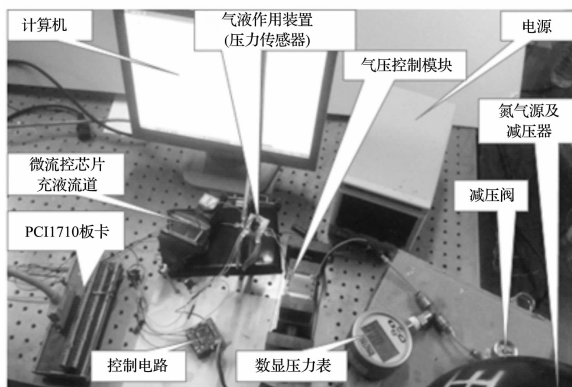
响应时间约为 1.7 s;在阀口开度达到 100% 时,压力动态响应时间约为 1.1 s。

3 实验

本研究根据微流控芯片气压驱动系统的结构原理,将已经加工装配的气压控制模块、气源作用装置、微流控芯片、气压源及其调节元件组合起来,搭建的试验平台如图5所示。



(a) 微流控芯片气压驱动系统原理图



(b) 微流控芯片气压驱动系统试验平台

图5 气体容腔压力动态响应特性试验

图5中,气体压力传感器的信号通过研华 PCI-1710 采集,系统在计算机上记录实验过程中的气体容腔的压力变化曲线。

本研究通过控制步进电机驱动器给步进电机输入不同的阶跃信号,实现阀口开度的阶跃响应,使流道高度分别从 0 位置跳跃到有效阀口高度为 30 μm 、40 μm 、50 μm 。试验中所采用的气体流道的尺寸为高度 50 μm 、宽度 100 μm 。在微阀动作过程中,气体压力传感器实时检测气体容腔的压力,并通过研华 PCI1710 板卡采集,在计算机上保存数据。处理不同阀口阶跃响应下气体容腔的压力信号,得到对应的气体容腔的压力特性如图6所示。

在阀口开度达到 60% 时,压力动态响应时间约为 1.8 s,稳定压力为 0.148 MPa;在阀口开度达到 100% 时,压力动态响应时间约为 1.1 s,稳定压力为 0.15 MPa。在不同阀口阶跃信号下测试的系统中气体容腔的压力变化特性曲线,与仿真结果基本吻合。

4 结束语

本研究针对目前气动微流控芯片控制系统微型化

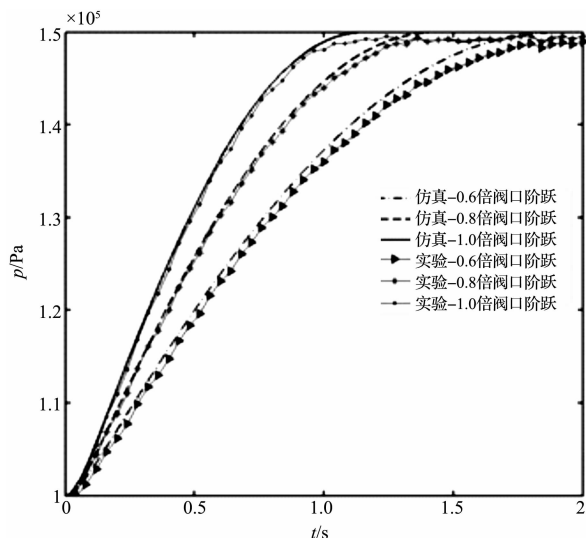


图6 不同阀口开度下系统气体容腔压力特性试验测试曲线

集成化的需求,提出一种采用步进电机的微控芯片气压驱动系统。在不同的阀口阶跃响应下,对比微流控芯片气压驱动系统气体容腔压力特性的实验结果和仿真结果可知,二者的气体容腔的压力特性变化趋势基本相同:当阀口开度小时,气体容腔的压力变化平缓,当阀口开度越大,气体容腔的压力上升越快,由于气压冲击的作用,上升斜率逐渐变慢。试验中气体容腔的压力变化稍慢于仿真特性,尤其在阀口开度较小的时候。随着阀口开度逐渐增大,气体容腔的压力变化特性的实验结果趋近于仿真结果。造成这种差异主要的原因可能是在系统管路中存在漏气的现象,同时各处管接头处存在少量的压力损失。随着阀口开度的增大,由于漏气与压力损失导致气体容腔压力的减小的作用逐渐减小。

参考文献 (References):

- [1] 林炳承,秦建华. 微流控芯片实验室[J]. 色谱,2005,23(5):456-463.
- [2] BERTHIER J. Microdrops and digital microfluidics[M]. Norwich: William Andrew,2012.
- [3] JANASEK D, FRANZKE J, MANZ A. Scaling and the design of miniaturized chemical-analysis systems[J]. Nature, 2006,442(7101):374-380.
- [4] BALAGADDÉ F K, YOU L, HANSEN C L, et al. Long-term monitoring of bacteria undergoing programmed population control in a microchemostat[J]. Science, 2005, 309(5731):137-140.
- [5] 申峰,李易,刘赵森,等. 基于微流控技术的微液滴融合研究进展[J]. 分析化学,2015,43(12):1942-1954.
- [6] 朱丽娜,祝莹,方群. 基于微流控技术的蛋白质结晶及其筛选方法的研究进展[J]. 高等学校化学学报,2014,

- 35(1):1-11.
- [7] LIU X L, LI S J, GANG B. Numerical simulation on the response characteristics of a pneumatic microactuator for microfluidic chips[J]. **Journal of Laboratory Automation**, 2015,21(3):412-422.
- [8] HONG J W,QUAKE S R. Integrated nanoliter systems[J]. **Nature Biotechnology**,2003,21(10):1179-1183.
- [9] THORSEN T, MAERKL S J, QUAKE S R. Microfluidic large-scale integration[J]. **Science**,2012,298(5593):580-584.
- [10] 张 朋,王殊轶,余传意,等. 输液泵/注射泵的发展趋势研究[J]. 中国医疗器械杂志,2009,33(4):282-285.
- [11] AMIROUCHE F, ZHOU Y, JOHNSON T. Current micro-pump technologies and their biomedical applications [J]. **Microsystem Technologies**,2009,15(5):647-666.
- [12] HANSEN C L, QUAKE S R, AUSTIN R H. From The Cover: Systematic investigation of protein phase behavior with a microfluidic formulator[J]. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**,2004,101(40):14431-6.
- [13] WANG J X, WEN Z, LI S J. Design of a Pneumatic Flow Rate Control Microvalve Driven by a Stepper-Motor[J]. **Applied Mechanics & Materials**,2015(779):244-249.
- [编辑:李 辉]

本文引用格式:

朱鋈峰,王进贤,李松晶. 采用步进电机的微流控芯片气压驱动系统压力特性研究[J]. 机电工程,2017,34(2):110-114.

ZHU Yun-feng, WANG Jin-xian, LI Song-jing. Pressure characteristics of pneumatic microfluidic chip system driven by stepper motor[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(2):110-114.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 109 页)

参考文献 (References):

- [1] 冯培恩,曾令斌,邱清盈,等. 机械功能对称的概念体系及其应用[J]. 机械工程学报,2012,48(11):1-10.
- [2] 马志勇,邱清盈,冯培恩,等. 机械对称性的概念体系及其应用方法[J]. 浙江大学学报:工学版,2010,44(12):2354-2359.
- [3] 马志勇. 机械对称的概念、作用及其应用知识获取的研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2010.
- [4] AGRAWAL R, SRIKANT R. Fast algorithms for mining association rules[J]. 计算机科学技术学报:英文版,2000,15(6):619-624.
- [5] DELGADO M. MARÍN N, SÁNCHEZ D, et al. Fuzzy Association Rules: General Model and Applications[J]. **IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS**,2003,11(2):214-225.
- [6] LATIRI C C, YAHIA S B, CHEVALLET J P, et al. Query expansion using fuzzy association rules between terms[J]. **International Journal of Biometeorology**, 1989,33(1):19-23.
- [7] LOPEZ F J, BLANCO A, GARCIA F, et al. Fuzzy association rules for biological data analysis: a case study on yeast[J]. **BMC Bioinformatics**,2008,9(4):1-18.
- [8] DELGADO G, ARANDA V, CALERO J, et al. Using fuzzy data mining to evaluate survey data from olive grove cultivation[J]. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2009,65(1):99-113.
- [9] 王 婷,宋俊德,宋美娜. 一种基于关联规则挖掘的 IP 定位方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2015,45(4):657-662.
- [10] 刘 帆,马志勇,张大霞,等. 机械结构静态对称概念体系及功能分析研究[J]. 机械设计与研究,2015,31(5):141-147.
- [11] HAN J W, KAMBER M. 数据挖掘概念与技术[M]. 3 版. 范明,孟小峰,等译. 北京:机械工业出版社,2012.
- [12] 胡可云,田凤占,黄厚宽. 数据挖掘理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [13] HAND D J, MANNILA H, SMYTH P. Principles of data mining[M]. Cambridge: MIT Press, 2001.
- [14] 阎书文. 机械式挖掘机设计[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [15] 柯热夫尼柯夫,耶西品柯,腊斯金. 机构参考手册[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [16] 李宗良,林永立(编译). 现代机构百科(上册)[M]. 北京:世界图书出版公司,1990.
- [17] 李宗良,林永立(编译). 现代机构百科(下册)[M]. 北京:世界图书出版公司,1990.
- [18] 严大考,郑兰霞. 起重机械[M]. 郑州:郑州大学出版社,2003.
- [编辑:李 辉]