

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.001

基于 AMESim 的新型 PDMS 微阀动态特性仿真研究*

符海, 刘旭玲, 许宏光, 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: 针对一种新型的可用于气动微流控芯片气压控制的电磁致动微阀的进一步研究和应用问题, 在阐述了其结构和工作原理的基础上, 利用 AMESim 软件建立了相应的动态仿真模型, 对其流量、压力动态特性进行了分析, 并且给出了该种微阀和传统气动电磁阀的流量、压力动态特性的对比分析结果。该种新型的电磁致动微阀由微流控芯片的上层 PDMS 平膜、具有微流道的下层 PDMS 厚膜和电磁致动器构成, 电磁致动器通过安装在阀座上的玻璃片与 PDMS 微流控芯片实现了集成。而且, 采用这种集成化的新型微阀的控制方式相较于传统采用气动电磁阀的控制方式, 具有成本低、体积小、易于与微流控芯片集成等优点。研究表明: 采用这种新型 PDMS 微阀对微流控芯片进行驱动和控制可以获得较好的动态特性, 并且该研究对电磁致动微阀的进一步研究和应用提供了一定的理论指导。

关键词: 气动微流控芯片; AMESim 仿真; 气压控制; 聚二甲基硅氧烷

中图分类号: TH137

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)09-1103-04

Dynamic simulation on new type of PDMS microvalve based on AMESim

FU Hai, LIU Xu-ling, XV Hong-guang, LI Song-jing

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

Abstract: Aiming at further researches and applications of a new type microvalve which can be used in pneumatic pressure control for lab-on-a-chip applications, on the basis of descriptions of its structure and working principle, an analysis of its flow and pressure dynamic characteristics, a corresponding simulation model with the use of the software AMESim and dynamic simulation were carried out. As a comparison a same analysis of traditional solenoid valve was given, as well. The new type microvalve is made up of upper layer PDMS flat film, lower layer PDMS thick film with microchannels in microfluidic chip and electromagnetic actuator. The electromagnetic actuator was integrated into the PDMS microfluidic chip by bonding the glass on the valve seat to the PDMS chip. Besides, the new PDMS microvalve's advantages such as lower cost, smaller size and easier integration with the microfluidic chip and so on than the traditional control method with pneumatic solenoid valves were described. The results indicate that it has good dynamic characteristics to drive and control the microfluidic chip with the new PDMS microvalve and provide a theoretical guidance for further researches and applications of this microvalve.

Key words: pneumatic microfluidic chip; AMESim simulation; pressure control; PDMS

0 引 言

微流控芯片实验室又称芯片实验室 (Lab-on-a-Chip) 或微流控芯片 (Microfluidic Chip), 指的是把生物和化学等领域中所涉及的样品制备、反应、分离、检测等基本操作单元集成或者基本集成到一块几个平方厘米 (甚至更小) 的芯片上, 由微通道形成网络, 以控

制流体贯穿整个系统, 用以取代常规生物或化学实验室的各种功能的一种技术^[1]。微流控芯片是微电子、生物和化学等技术相结合的产物, 目前, 它已被广泛应用于生物、化学、医学等行业中的临床分析及疾病检测、环境监测、核酸和蛋白质分析以及细胞和离子的检测等多方面, 并且形成了多学科交叉的一个研究热点, 被列为 21 世纪最为重要的前沿技术之一。

收稿日期: 2014-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175101)

作者简介: 符海 (1989-), 男, 四川巴中人, 主要从事机械电子工程专业、流体控制及自动化方面的研究. E-mail: fuhai19890909@163.com

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

微流控芯片的用途十分广泛,但是目前流行的微流控芯片的最大的不足之处是它们都需要大量辅助设备,体积庞大且成本很高,因此极大地限制了该微流控芯片的应用^[2]。近年来,Stephen R Quake 教授提出的依靠外部气动控制系统驱动和控制的气动微流控芯片成为微流控芯片的一种重要形式,并且已在许多领域得到了越来越广泛的应用。该气动微流控芯片^[3]由多层 PDMS 薄膜^[4]通过软刻蚀方式制作而成,在气动控制层,以某种序列信号,依次控制各气动致动器的开启或关闭,从而在流体流动层中产生对液体的挤压和诱导作用,以实现传输、控制流体的功能^[5]。但由于其外部气路控制系统中仍然采用常规电磁阀或阀组,这种常规的电磁阀本身仍然存在着价格昂贵、体积庞大等等缺点,且其以硬质材料制成,存在着无法与 PDMS(聚二甲基硅氧烷,通常被称为有机硅,固态时作为一种硅胶)材料的微流控芯片进行集成等问题。

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,并结合目前微流控系统微阀的发展现状,文献[6-7]中提出了一种微型化、结构简单,且易于与气动微流控芯片集成的电磁驱动微阀,并对该阀进行了阀口静态特性仿真。这种新型的微阀较好地解决了常规电磁阀价格昂贵、体积大、无法与 PDMS 微流控芯片集成等问题。

本研究利用 AMESim 软件,对这种新型 PDMS 微阀的流量及压力动态特性进行仿真研究,并将其与传统气动电磁换向阀进行特性比较。

1 新型微阀的结构和工作原理

笔者所研究的微型化、结构简单且易于与气动微流控芯片集成的 PDMS 电磁驱动微阀,是将其原来外部气动控制系统中的气动电磁阀集成到了微流控芯片上,其结构如图 1 所示。

集成在微流控芯片上的电磁微阀组的基本构成单元是气动电磁微阀,这种新型微阀主要由:电磁致动器、上层 PDMS 平膜、带微流道的下层 PDMS 厚膜构成。其中,电磁致动器通过精密的加工制造技术制成,其衔铁(阀芯)头部直径仅为 1 mm,在阀座上通过玻璃片与上层 PDMS 平膜结合在一起,具有结合强度大之特点,实现了新型 PDMS 微阀与微流控芯片的集成化。

电磁致动微阀的具体工作原理如下:当电磁致动器未通电时,由于弹簧的预紧力的作用会推动阀芯,阀芯压向上层 PDMS 薄膜,薄膜向下变形,堵塞阀口,微阀处于关闭状态;当致动器通电时,产生的电磁吸力克

服弹簧弹力,将阀芯吸起,上层薄膜形变恢复,流道导通;当电磁致动器断电时,电磁吸力消失,阀芯被在弹簧力作用下向下运动,迫使薄膜向下变形,流道关闭。新型 PDMS 微阀的电磁致动器采用直流 24 V 供电,电流为 42 mA,功耗仅为 1 W。

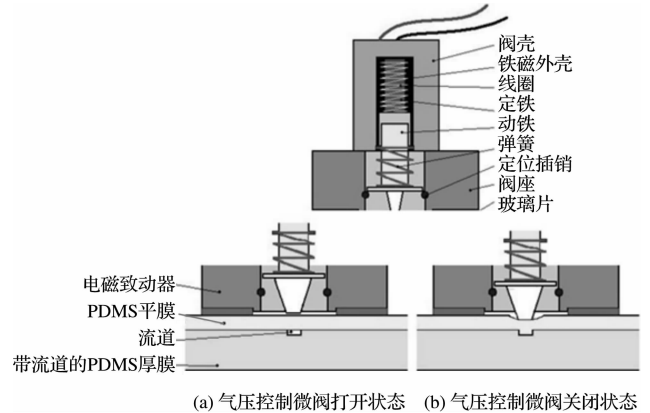


图 1 气压控制微阀结构示意图

采用所设计 PDMS 电磁微阀工作原理如图 2、图 3 所示。

实现这种集成电磁驱动微阀功能的一种结构如图 2 所示,本研究在微流控芯片上设计出微流道,并通过驱动集成在芯片上的新型的电磁致动微阀组,进行简单的控制逻辑组合,例如左侧线圈得电接通(开启 P 口通道),右侧线圈失电断开(关闭 T 口通道),实现了向气动执行元件提供压缩空气的功能;右侧线圈得电接通(开启 T 口通道),左侧线圈失电断开(关闭 P 口通道),实现了气动执行元件排气的功能。这样就可以利用该种新型的电磁致动微阀组,来替代传统的气动电磁阀。

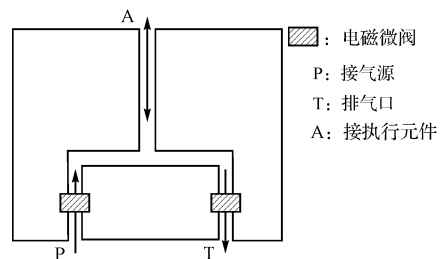


图 2 集成在微流控芯片上的电磁微阀组工作原理

采用所设计 PDMS 电磁微阀实现气动微流控芯片气动流道压力控制的工作原理为:当 PDMS 电磁微阀处于图 3(a)所示的左位(通态)时,通过集成在微流控芯片上的电磁微阀向芯片的气压控制微流道提供压缩空气;当 PDMS 电磁微阀换向,处于图 3(b)所示的右位(断态)时,外部控制回路不再向微流控芯片的气动执行元件提供压缩空气,气动执行元件中气体通过电磁阀排出,气压控制微流道中压力降低。

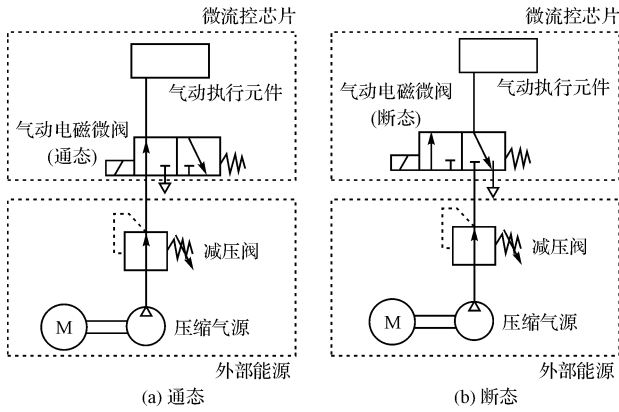


图3 集成了新型 PDMS 微阀的微流控芯片驱动和控制技术结构原理

2 AMESim 动态仿真模型

AMESim 是一款基于键合图的液压机械系统建模仿真及动力学分析软件^[8],在液压系统的动态模拟中已经得到了越来越广泛地运用^[9]。AMESim 软件提供了图形化建模方法^[10],不仅方便了仿真模型的建立,而且所建立的仿真模型一般与系统的工作原理图相似,仿真模型设置的各种参数均具有实际的物理意义。

本研究利用 AMESim 软件对这种新型的微阀的动态特性进行分析。

首先,本研究根据该微阀的结构和工作原理,建立相应的仿真模型。AMESim 的动态仿真模型及其对比模型如图 4 所示。集成的电磁致动控制微阀由:电磁铁

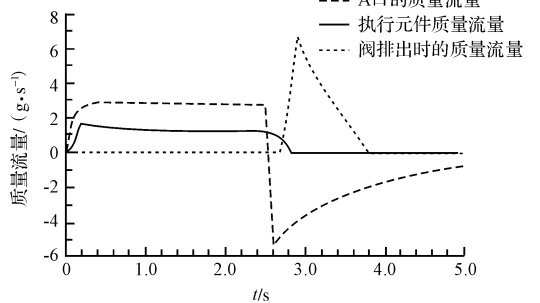
模块、带限位和摩擦力的质量模块、表征弹簧和 PDMS 平膜弹性的力发生模块、表征微阀动态特性而在进出口设置的弹性容腔和可变节流口等模块组成。本研究在溢流阀和弹性容腔之间加设置的节流口,表示外部的能源回路与芯片之间接口的节流作用,执行元件是具有弹性可变形腔体元件,用图 4 左侧模型中所示的组合模块加以表征。压缩空气由电机驱动一个定量泵提供,并在泵的出口处通过溢流阀设定系统的压力为 10 bar。

同时,本研究建立的对比仿真试验模型为图 4 中右侧模型,与图 4 中左侧模型相比而言,集成在 PDMS 微流控芯片上的电磁致动控制阀组由两位三通的电磁阀的模块替代,并且减少了一个弹性容腔,其余模块和仿真参数设置均不改变。

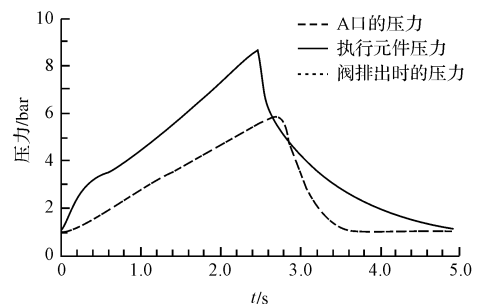
3 AMESim 动态仿真分析结果

3.1 控制阀出口质量流量、压力仿真结果

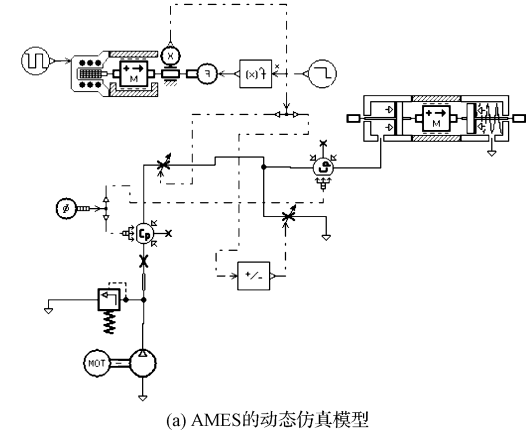
电磁致动控制微阀的出口质量流量仿真分析结果如图 5(a) 所示。图 5(a) 中线 1 表示对比仿真模型中两位三通电磁阀 A 口的质量流量特性,正值表示工作介质由 A 口流入执行元件,负值表示工作介质由执行元件通过 A 口流出。线 2 和线 3 表示电磁致动控制微阀的 P 口、T 口的质量流量特性。从图 5(a) 中可以看出,在质量流量特性上电磁致动控制微阀组在响应速度上稍差于传统的电磁阀,并存在有一定的延时现象,但在气动执行元件排气时的速度方面却优于传统的电磁阀,排气时间短,并且在信号突然加载(或卸载)时



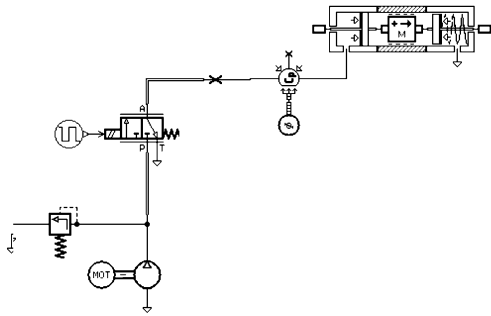
(a) 流量特性



(b) 压力特性



(a) AMES 的动态仿真模型



(b) 对比仿真试验模型

图4 AMESim 动态仿真模型及其对比模型

图5 控制阀的出口质量流量和压力特性

质量流量特性整体上较平缓一些。

电磁致动控制微阀的出口压力仿真分析结果如图 5(b)所示。图 5(b)中线 1 表示对比仿真模型中两位三通电磁换向阀 A 口的压力特性。线 2 和线 3 表示电磁致动控制微阀组的压力特性。从图中可以看出,电磁致动控制微阀组的压力最大压力值处的曲线过渡较为平缓,曲线整体也更加平滑,表明压力变动过程较平稳,并且在排气过程中压力释放速度较快,排气时间短。因此,电磁致动的微阀组的压力特性要优于传统的电磁换向阀控制。

3.2 气压控制微流道的体积(流量)、压力仿真结果

气压控制微流道的体积(流量)和压力特性如图 6 所示。

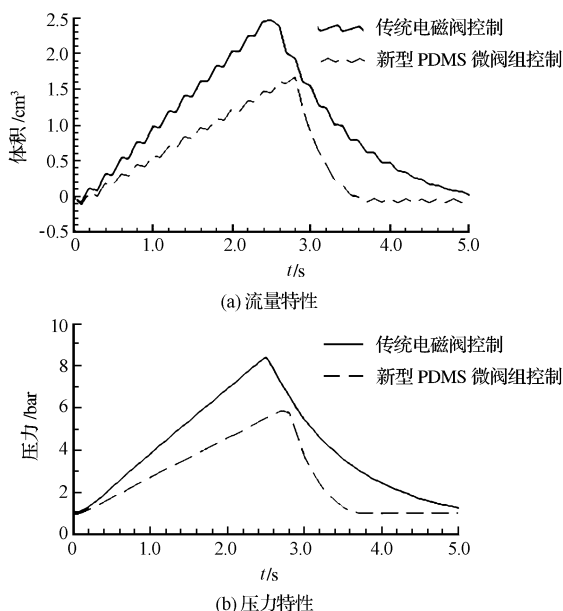


图 6 气压控制微流道的体积(流量)和压力特性

其中,气压控制微流通入口的流量仿真分析结果如图 6(a)所示。图 6(a)表明,在体积(流量)特性上,新型电磁致动控制微阀组控制下进入气压控制微流道入口处的气体体积响应速度稍低于传统的电磁阀,但体积增加过程中其波动幅度较小,在排气时的流量的变化速度大,并且排气过程变化较为平稳,排气时间短。

气压控制微流道入口的压力仿真分析结果如图 6(b)所示。由图 6(b)可见,采用新型电磁致动控制微阀组控制时,压力在增加阶段,压力波动较为平缓,整体压力曲线也更为平滑,并且在排气过程中压力释放较快,压力波动平稳,排气时间短。

4 结束语

本研究利用 AMESim 软件对一种新型 PDMS 微阀的动态特性进行了仿真研究,仿真分析结果表明该新型微阀组的质量流量动态特性在响应速度上稍差于传统气动电磁阀,并且存在一定的延时,但在质量流量特性增加的阶段波动幅值较小;在压力特性中压力的增加较为平缓,排气过程中压力释放较快,压力释放时间短,其整体压力动态特性要优于传统的电磁阀控制。因此仿真结果表明,采用这种新型 PDMS 微阀对微流控芯片进行驱动和控制可以获得较好的动态特性。

随着微流控芯片技术的不断发展,对其微型化、集成化、经济性等要求也越来越高,而这种新型 PDMS 微阀主要由电磁致动器、上层 PDMS 平膜,带微流道的下层 PDMS 厚膜构成。在阀座上通过玻璃片与上层 PDMS 平膜结合在一起,实现了和微流控芯片的集成化,且在成本上远低于气动电磁阀,经济性好,同时它还具有结构简单、动态控制特性较好等优点。

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] 刘晓为,张海峰,王 蔚,等. 芯片实验室技术及其应用[J]. 测试技术学报,2006,20(6):471-479.
- [3] QUAKE S R, SCHERER A. From micro-to nanofabrication with soft materials[J]. Science,2000(290):1536-1540.
- [4] HONG J W, QUAKE S R. Integrated nanoliter systems[J]. Nature Biotechnology,2003,21(10):1179-1183.
- [5] UNGER M A, CHOU H P, THORSEN T, et al. Monolithic microfabricated valves and pumps by multilayer soft lithography[J]. Science,2000(288):113-116.
- [6] 李松晶,刘旭玲,贾伟亮. 气动电磁微阀的仿真研究[J]. 液压与气动,2013(7):6-8.
- [7] 尹祖军,吴中文,周志鸿. 浅析一款车用气动电磁阀发热问题[J]. 液压气动与密封,2012(7):37-40.
- [8] 刘海丽,李华聪. 液压机械系统建模仿真软件 AMESim 及其应用[J]. 机床与液压,2006(6):124-126.
- [9] 袁士豪,殷晨波,刘世豪. 基于 AMESim 的平衡阀动态性能分析[J]. 农业机械学报,2013,44(8):273-280.
- [10] 郑昌马,吴坚锋,马 冲,等. 基于 AMESim 的 PQ 泵特性研究[J]. 机电工程,2010,27(1):59-61.

[编辑:罗向阳]

本文引用格式:

符 海,刘旭玲,许宏光,等. 基于 AMESim 的新型 PDMS 微阀动态特性仿真研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1103-1106.

FU Hai, LIU Xu-ling, XU Hong-guang, et al. Dynamic simulation on new type of PDMS microvalve based on AMESim[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(9):1103-1106.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>