



引用格式:刘旭玲,李松晶.气动微流控芯片 PDMS 电磁微阀设计与性能研究[J].轻工学报,2018,33(4):57-65.

中图分类号:TH137.52 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.008

文章编号:2096-1553(2018)04-0057-09

气动微流控芯片 PDMS 电磁微阀设计与性能研究

Design and characterization study on PDMS electromagnetic microvalve for pneumatic lab-on-a-chip

刘旭玲¹,李松晶²

LIU Xuling¹,LI Songjing²

1. 郑州轻工业学院 机电工程学院,河南 郑州 450002;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001

1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

关键词:

气动微流控芯片;电磁微阀;流场仿真;出口流量

Key words:

pneumatic lab-on-a-chip; electromagnetic microvalve; flow fluid simulation; outlet flow rate

摘要:针对常规电磁阀和阀组结构复杂、尺寸巨大,很难与微流控芯片进行集成的问题,采用新型阀体材料高弹 PDMS,设计了一种新型电磁微阀.通过 Fluent 软件嵌入 UDF 函数对典型驱动压力下不同阀口开度电磁微阀的静、动态流量特性进行数值仿真,并对开关和脉冲宽度调制(PWM)两种模式下电磁微阀流量特性进行了实验研究,结果表明:在驱动频率相等的情况下,电磁微阀流量与压差呈正比;当压差一定时,电磁微阀流量与驱动频率呈反比,电磁微阀平均流量与占空比呈正比;电磁微阀出口流量与阀口开度呈正比.所设计的电磁微阀流量控制精度高、封装成本低,能够提高微流控芯片的集成化程度和控制性能.

收稿日期:2017-03-16;修回日期:2017-12-22

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51175101);郑州轻工业学院博士科研基金项目(2016BSJJ015)

作者简介:刘旭玲(1981—),女,河南省周口市人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为微流体驱动与控制、自动化测控系统.

通信作者:李松晶(1970—),女,黑龙江省哈尔滨市人,哈尔滨工业大学教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为微泵、气动微阀、微流控驱动装置.

Abstract: In view of the complicated structure and the large size of the regular electromagnetic valve and valve block and the difficulty in their integration with micro-fluidic chip, a new type of the electromagnetic microvalve was designed using PDMS, a new type of valve body. The numerical simulation of the static and dynamic flow rate characteristics of the electromagnetic microvalves with different valve-openings was made by Fluent software with UDF function under typical driving pressure. And experiment was made on the flow characteristics of electromagnetic microvalves under On-Off model and PWM model. The results showed that under the same driving pressure, electromagnetic valve flow was proportional to its pressure difference; under the same pressure difference, the average flow of electromagnetic valve was inversely proportional to its driving frequency and its opening flow was proportional to its duty cycle. The designed electromagnetic microvalve had high flow control precision, low cost of encapsulation and could improve the integration and control of pneumatic micro-fluidic chip.

0 引言

微流控芯片大规模集成(mLSI),指的是在几 cm^2 大小的芯片上集成上百、甚至上千个微阀、微泵、微混合器等功能部件,进行各种化学反应和生物分析,用以取代常规化学或生物实验室的一种技术平台^[1]. 哈佛大学 Quake 研究组^[2]提出微流控芯片超大规模集成(mVLSI),进一步提高了微流控系统的集成度和使用率. 高密度气动微流控芯片的驱动和控制离不开外部气路控制系统的作用,目前外部气路控制系统组成元件中的电磁阀和阀组仍然使用常规尺寸^[3-4],与微流控芯片本身相比,结构复杂、尺寸巨大,很难与微流控芯片进行集成,不便于携带^[5-6],因而成为气动微流控芯片系统进一步高度集成化的瓶颈.

气动微流控芯片外部微阀是微流控系统一个新的研究热点. 本文将针对气动微流控芯片控制系统的需求,提出一种微型化、结构简单、易于封装、省时、费用低、易与气动微流控芯片集成的电磁微阀设计方案,并对其性能进行分析,为进一步提高气动微流控芯片系统的集成化程度提供参考.

1 电磁微阀结构设计与工作原理

1.1 电磁微阀

针对现有电磁微阀结构复杂,尺寸巨大的

问题,要实现小尺寸、高集成度的设计目标,本设计采用高弹 PDMS 新型阀体材料,替代常规电磁阀采用的金属、聚酰亚胺、聚碳酸酯等硬质材料,电磁微阀的 PDMS 阀膜也可充当弹垫,以提高其密封性能.

本文设计的电磁微阀由电磁驱动器和阀体组成,电磁微阀结构和工作状态如图 1 所示. 当电磁驱动器未通电时,由于弹簧的预紧力推动阀芯,阀芯下压上层 PDMS 阀膜,阀膜向下变形,堵塞阀口,电磁微阀处于关闭状态,如图 1a)所示;当驱动器通电时,产生的电磁吸力克服弹簧弹力,阀芯上移,上层阀膜形变恢复,电磁微阀打开,如图 1b)所示,微流道导通;当电磁驱动器断电时,阀芯被弹簧的恢复力推向上层 PDMS 阀膜,阀膜向下变形,电磁微阀关闭,使微流道切断. 电磁微阀属于常闭阀,气动微流控芯片系统紧急断电时,常闭阀可以迅速切断气路,防止因气路系统压力过高而损坏气动微流控芯片系统.

阀膜在运动过程中主要受到电磁力、阀腔内流体的反作用力和阀膜本身材料性质的弹力等力的作用. 电磁微阀阀腔流体运动结构模型如图 2 所示. 其中, w 为电磁微阀宽度, d 为电磁微阀长度,阀膜沿 z 轴作上下往复运动以打开或关闭阀门. 根据电磁微阀的结构和运动特征,设定以下边界条件: x, y 方向阀腔内壁固

定,边界不存在滑移; z 方向,阀腔底面固定,上表面与阀膜接触,阀膜沿 z 方向做往复运动,阀腔高度设为 h ,并满足边界条件 $z = 0$ 或 $z = h$ 时, x 方向和 y 方向流速 $u = v = 0$ 。

在微尺度下,宏观流体力学的连续性方程和纳维 - 斯托克斯方程仍然适用^[7]。仅在速度接近或超过声速的特殊情况下才考虑气体的可压缩模型,气体在大多数情况下可以采用不可压缩模型,因此本文在研究中仍将工作介质视为不可压缩气体。

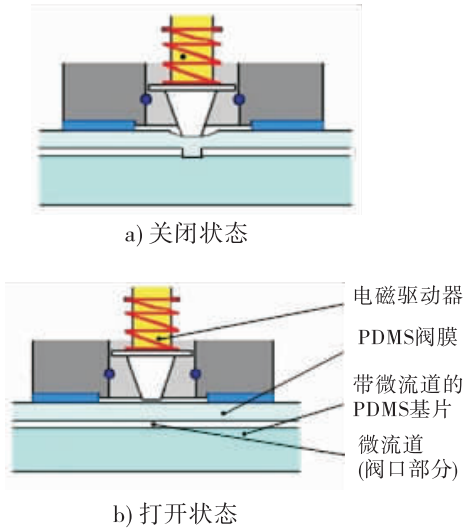


图 1 电磁微阀结构和工作状态示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of structure and working states of the electromagnetic microvalve

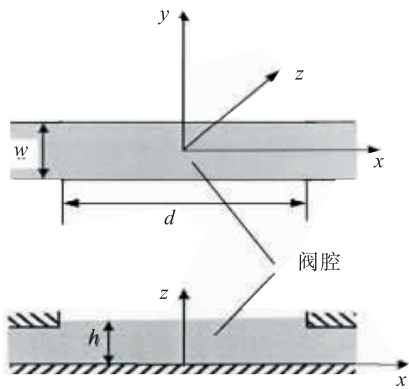


图 2 电磁微阀阀腔流体运动结构模型

Fig. 2 Model of the valve-chamber fluid of the electromagnetic microvalve

1.2 电磁驱动器

电磁微阀采用的电磁驱动器属于吸入式电磁铁,能提供导磁率较高的磁通路,衔铁与铁芯之间气隙的磁压降在整个磁通路中占主导地位,电磁驱动器磁路示意图见图 3^[8-9]。

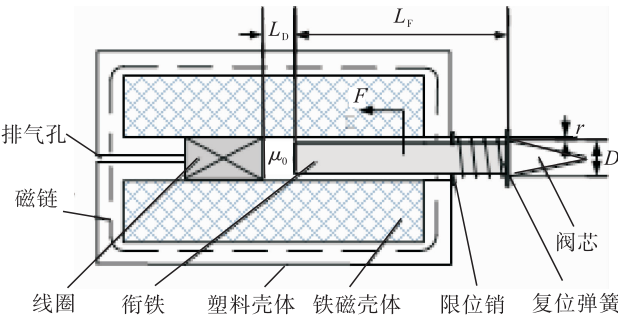


图 3 电磁驱动器磁路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic circuit for the electromagnetic actuator

动铁上的拉力由定铁与动铁之间的拉力和绕组与动铁间的拉力组成。动铁与定铁之间的拉力

$$F_1 = \frac{\mu A}{2f} \left(\frac{In}{L} \right)^2 \quad (1)$$

式中, μ 为空气磁导率 / ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$); A 为动铁截面积 / m^2 ; f 为漏磁系数,无量纲; I 为线圈电流 / A ; n 为线圈匝数,无量纲; L 为磁通路长度 / m 。

其中,空气导磁率 $\mu = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$,若只考虑空气导磁率而不考虑磁路中其余部分的导磁率及其长度,式 ① 可写成

$$F_1 = 6.285 \times 10^{-7} \frac{A}{f} \left(\frac{In}{L_A} \right)^2$$

式中, L_A 为气隙最大长度。

绕组与动铁间的拉力 F_2 产生原理如下:把一根铁棒插入一个不带外壳或定铁的螺线管中,铁棒受到的拉力就是 F_2 。对于给定的线圈来说,拉力与流过线圈的电流呈正比。当铁棒插到线圈长度的 40% ~ 80% 之间时,受拉力最大^[10]。在这段距离上,拉力几乎不变,其大小可表示为

$$F_2 = \frac{KAIn}{L_c}$$

式中, K 为系数, 取决于线圈尺寸、磁路饱和程度和动铁的长度与材料, 通常假定 $K = 1.75$; L_c 为线圈长度; 吸入式电磁铁的漏磁系数一般假定 $f = 1$, 故可忽略不计。

动铁受到的总拉力 F 为

$$F = F_1 + F_2 = 1.75 AIn \left(\frac{1}{L_c} + 3.6 \times 10^{-2} \frac{In}{L_A^2} \right)$$

2 电磁微阀流场仿真方法

2.1 电磁微阀阀口模型与网格划分

为了对电磁微阀前后流场的流速、压力分布情况进行仿真, 在电磁微阀外部建立了较大的区域作为电磁微阀外部入口和出口的流动区域, 电磁微阀阀口模型网格划分如图 4 所示, 其中, $AB = EF = 90 \mu\text{m}$, $BC = DE = 14.95 \text{ mm}$, $CG = HD = 5 \mu\text{m}$, $GH = 100 \mu\text{m}$, $FA = 30 \text{ mm}$ 。

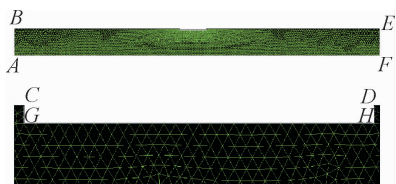


图 4 电磁微阀阀口模型网格划分
(阀口开度为 90%)

Fig. 4 Model meshing of the electromagnetic microvalve port (valve-opening is 90%)

将几何模型导入到有限元软件 ANSYS 中的 Gambit 进行网格划分, 网格划分的质量决定仿真结果的准确性, 由于电磁微阀入口处、出口处和电磁微阀阀芯下部变形区域上的速度流场和压力变化比较大, 为了准确反映流场的变化情况, 对这几个部分的网格进行加密, 其余部分网格相对稀疏。三角形网格具有更好的配合性, 因而整个模型都采用三角形网格进行划分。

2.2 流场边界条件的确定

本文采用多相流中的混合模型, 其中 AB

为电磁微阀入口, 边界条件为压力入口 (pressure inlet), 压力值为电磁微阀的仿真入口压力; AB, BC, DE, FA 均为无滑移边界壁面 (wall); EF 为压力出口 (pressure outlet) 压力值为 0 kPa ; GH 为运动壁面 (moving wall); CG, DH 为变形壁面 (deforming wall)。

3 实验条件

3.1 实验件封装

电磁驱动器用磁铁作基材, 具有塑料外壳, 阀芯也是塑料材质, 由超精密加工设备制作完成 (由哈尔滨工业大学气动中心加工制造), 电磁微阀封装实物如图 5a) 所示。阀体结构包括上层 PDMS 平膜、具有微流道的下层 PDMS 厚膜, 如图 5b) 所示。平膜薄而柔软, 用作阀膜, 而且能够充当弹垫的作用, 电磁微阀关闭时防止漏气。阀体采用制造气动微流控芯片系统常用的高弹性材料 PDMS, 不仅因为高弹 PDMS 材料透明便于肉眼对齐封装, 而且封装的多个电磁微阀组成阀组能够作为一个模块, 便于与气动微流控芯片系统进行整体集成。

电磁微阀的封装尺寸由驱动器的尺寸决定, 但是为了测试电磁微阀的性能, 便于与外部供应气路连接, 采用微流道长度 30 mm 。电磁微阀实验件尺寸参数如下: 驱动器长、宽、高分别为 20.5 mm , 9.8 mm , 12 mm ; 阀芯直径 1 mm , 阀芯传递力 0.5 N ; 微流道长、宽、深分别为 30 mm , 0.5 mm , 0.1 mm ; PDMS 平膜厚度 0.5 mm , PDMS 平膜基质: 固化剂 = $15 : 1$; PDMS 厚膜厚度 5 mm , PDMS 厚膜基质: 固化剂 = $8 : 1$ 。电磁微阀的封装尺寸仅为 $30 \text{ mm} \times 17.5 \text{ mm} \times 9.8 \text{ mm}$ 。

3.2 电磁微阀测试装置

电磁微阀特性测试装置原理如图 6 所示, 由被测试电磁微阀、微小气体流量传感器、微小压力传感器、激光微位移传感器、压缩氮气源、

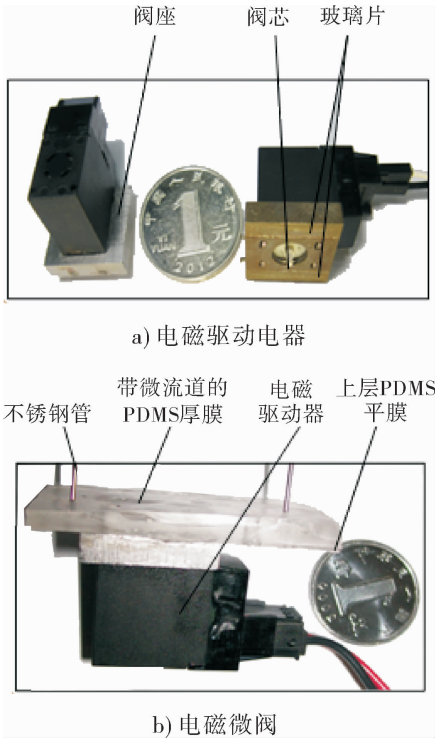


图5 电磁微阀封装实物图

Fig. 5 Pictures of the packaged electromagnetic microvalve

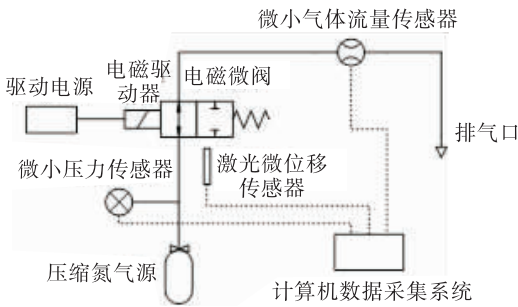


图6 电磁微阀测试原理图

Fig. 6 Test principle schematic diagram of the electromagnetic microvalve

计算机数据采集系统等组成. 从高压氮气瓶出来的高压气体与普通减压阀、精密减压阀相连, 通过微小压力传感器得到电磁微阀两端压力差, 通过调节减压阀得到不同工况下气体的控制压力, 气体经过电磁微阀后进入到微小气体流量传感器, 最后排入大气.

实验所采用的 ASF1430 型微小气体流量

传感器动态测量范围为 $\pm 400 \text{ mL/min}$, 能承受的气体压力最高可超过 29 psi (200 kPa), 最小分辨率可精确到 0.0143 mL/min , 采用简单的 COM 串口方式与计算机进行通信, 电源电压为 12 V , 耗能低. 它具有体积小、响应快、测量精度高等优点, 可以满足测试气体微流量动态变化的要求.

选用 Kulite 公司的 XCL-080 型压阻式微小压力传感器(电源电压为 9 V)来测量电磁微阀所承受的压力. 它体积小、响应快、测量精度高, 头部直径 2 mm , 工作量程 200 kPa , 可以满足电磁微阀实验系统的需求.

选用上海游然传感科技有限公司生产的 EVT-18C 型单点式铝合金力传感器, 其量程为 $0 \sim 3 \text{ N}$, 测量精度可达 1% . 力传感器为电阻应变式称重传感器, 其利用电阻应变片变形时电阻也随之改变的原理工作. 主要由弹性元件、电阻应变片、测量电路和传输电缆四部分组成. 力传感器输出信号为 $0 \sim 10 \text{ V}$ 电压, 多次不加力时测量, 零点漂移电压为 -0.86 V .

数据采集系统采用研华 PCI-1710-CE 采集卡, 它具有 16 路模拟量输入端口和 2 路模拟量输出端口, 能够满足系统需求. 采用差分接法采集压力传感器输出信号, 可有效抑制干扰信号. 模拟输入端口信号采集范围选择 $0 \sim 10 \text{ V}$.

4 电磁微阀性能分析

4.1 电磁微阀驱动力测试结果分析

使用力传感器对电磁驱动器出力进行测量, 电磁驱动器驱动力测量实验装置如图 7 所示.

经过 6 次重复测量, 电磁驱动器出力平均值为 0.844 N , 各测量值均大于电磁驱动器驱动力仿真值和设计需求值. 电磁驱动器驱动力结果如下: 实验测量平均值 0.844 N , 仿真值

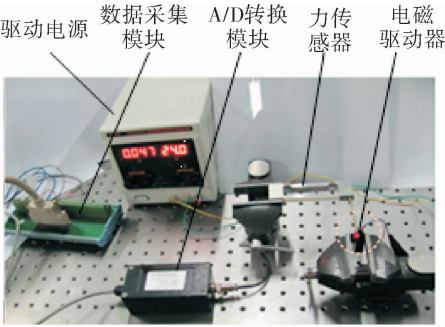


图 7 电磁驱动器驱动力测量实验装置
Fig. 7 Experimental setup for testing the spool actuated force

0.881 N,理论计算值 0.983 N,设计需求值 0.220 N.

考虑 PDMS 电磁微阀最高承受气压 280 kPa,阀芯直径 1 mm,阀芯受到的最大反作用力为 0.220 N,因此电磁微阀驱动力在任何情况下都能够关闭电磁微阀.

4.2 电磁微阀静态流量结果分析

施加电压和去掉电压后,电磁微阀处于打开或关闭状态.电磁微阀完全关闭时所测流量是电磁微阀的泄漏量,是反映产品控制精度的非常重要的一项指标.

电磁微阀泄漏量如图 8 所示,图 8 中虚线代表泄漏量仿真值在任何压力下均为 0,这是忽略实际因素所致.气体泄漏量基本与压差大小呈正比,但是从测量结果看,压差达到 200 kPa 时,电磁微阀泄漏量仅为 0.259 mL/min,这是因为柔软坚韧的 PDMS 阀膜充当了防止漏气的胶垫,而且流量传感器本身最小分辨率为 0.014 7 mL/min.相比同行业电磁微阀,泄漏量较低,电磁微阀截止性能良好.

图 9 描述了电磁微阀在完全打开状态下,出口流量与所加压力呈线性关系.矩形微流道平均流量公式为

$$\bar{Q} = \frac{\Delta p r_0^2}{8 \mu l}$$

其中,Δp 为流体单元两端压力差,r₀ 为矩形管

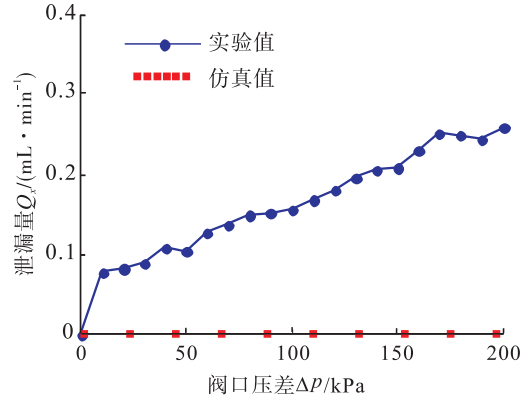


图 8 电磁微阀泄漏量示意图
Fig. 8 The sketch map of leak flow rate of the electromagnetic micrvalve

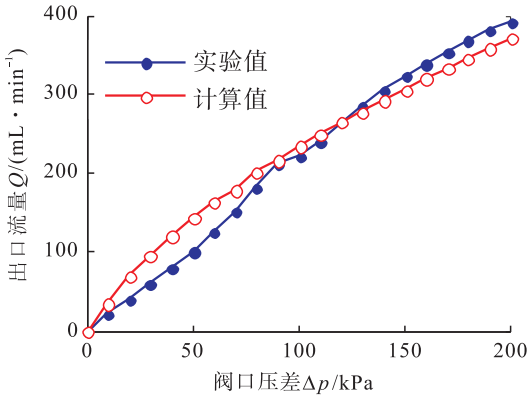


图 9 电磁微阀完全打开状态下出口流量
Fig. 9 Flow rate under fully open state of the electromagnetic micrvalve

道水力半径,μ 是流体动力黏度,l 为流经长度.从实验结果和理论公式对比可以看出,实验结果完全与期望的一样呈线性关系.斜率反映的是电磁微阀在完全打开状态下,微流道尺寸结构一定时,由材料原因形成的流阻大小.从图 9 中可以看出,当压差大于 120 kPa,流量试验值大于计算值,这是由于 PDMS 在高压下变形扩充,使得整个流道变大,从而使电磁微阀流量变大.

4.3 不同模式流量的特性与结果分析

电磁驱动电磁微阀有两种工作模式,开关模式和脉冲宽度调制 (PWM) 模式^[12-13],其流量特性也具有不同的特点.

4.3.1 开关模式 在开关模式下,改变压差范围 0 ~ 200 kPa,改变电磁驱动器的驱动频率范围 0 ~ 50 Hz,步长 5 Hz,测量电磁微阀出口流量.

图 10 直观地表达了不同压差下电磁微阀驱动频率与出口流量之间的关系,并通过数字证明了其间的比例线性关系. 从图 10 可以看出,在驱动频率相同的情况下,电磁微阀流量与压差呈正比;当电磁微阀入口、出口压差一定时,电磁微阀流量与驱动频率呈反比,即驱动频率越高,电磁微阀出口流量越小. 其原因是:当驱动频率较高,给驱动器通断电时,电磁微阀并没有完全打开或完全关闭,因此导致电磁微阀出口流量下降. 占空比为 0.5,压差为 120 kPa,驱动频率 1 Hz 时,电磁微阀最大出口流量可达到 233.2 mL/min.

4.3.2 PWM 模式 在 PWM 模式下,占空比 $DC = t_{on}/T$,其中, t_{on} 是一个周期内高电平时间, T 是信号周期. 电磁微阀流量 $Q = Q_{FS} \times DC$,其中 Q_{FS} 是满标度流量,即 $DC = 1$ 时电磁微阀流量. 电磁微阀工作在 PWM 模式下,驱动电压是方波信号,改变驱动信号占空比,在各种压差下分别对电磁微阀平均流量进行测量.

图 11 直观地表达了电磁驱动电磁微阀平均流量、压差、占空比之间的关系. 从图中可以

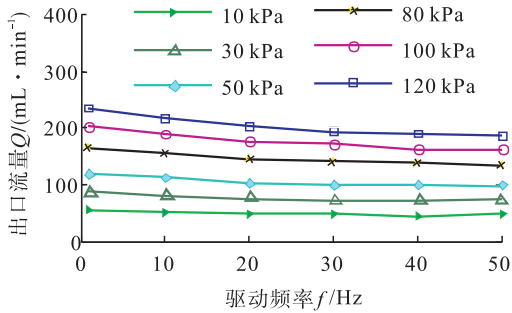


图 10 电磁微阀流量 - 压差 - 驱动频率实验结果
Fig. 10 Experimental results of flow rate-pressure differential-actuated frequency of the electromagnetic microvalve

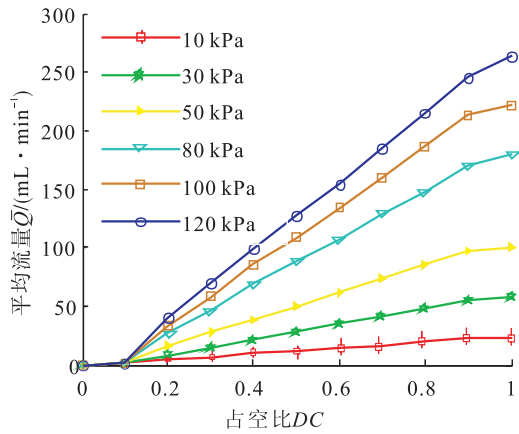


图 11 电磁微阀流量 - 压差 - 占空比实验结果
Fig. 11 Experimental results of flow rate-pressure differential-duty cycle of the electromagnetic microvalve

看出,占空比越小则平均流量越小,这是因为占空比越小,相当于在固定时间内电磁微阀关闭的时间长,而电磁微阀处于打开状态的时间则短. 当占空比取极限值 0 时,电磁微阀相当于完全关闭,理论平均流量也为 0. 占空比越大,电磁微阀平均流量也就越大,即电磁微阀处于完全打开状态.

当占空比小于 0.1 时,电磁微阀的平均气流量在三种压差下均小于 0.2 mL/min,因此在图中显示结果几乎为 0. 这是因为电磁微阀阀口平均开度很小,流体黏性起主要作用,相当于流阻比较大,压差一定时,流量则较小. 当占空比大于 0.1,压差一定时,电磁微阀平均流量与占空比呈线性关系,可为电磁微阀的 PWM 闭环控制创造良好条件. 占空比有很小的改变时,流量相应地就会有较大比例的改变,这使得测量流量有很高的分辨率.

图 12 描述了压差为 100 kPa 时,不同驱动频率下电磁微阀出口流量与占空比特性实验数据与仿真结果比较, f_a 是给电磁微阀施加 PWM 脉冲信号的频率. 由图 12 可知,在 $0.45 < DC < 0.95$ 这段范围内,电磁阀出口流量仿真值略低于实验值;其他范围内,实验值与仿真值相差无

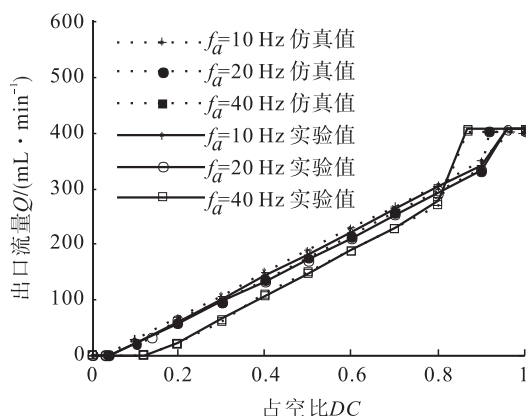


图 12 不同驱动频率和占空比下
电磁微阀出口流量特性
(阀口压差为 100 kPa)

Fig. 12 Flow rate characteristics of the
electromagnetic microvalve port under different
actuated frequency and duty cycles
(pressure differential is 100 kPa)

几,而且从总体趋势上看,出口流量仿真值与实验值都与占空比呈正比,与理论模型一致。

4.3.3 不同阀口开度下电磁微阀流量特性

由于电磁微阀属于开关型电磁阀,很难让阀芯处于某一种开度的状态,因此设计了手动驱动装置. 利用手动旋转螺栓 M3 * 30 (GB 818—85) 的方式,精确控制阀芯的位移,以获得阀口开度,从而测量在各个阀口开度下电磁微阀出口流量。

不同阀口开度下的出口流量特性如图 13 所示. 从图 13 可以看出,阀口开度较小的情况下,实验值均小于仿真值. 当阀口开度趋近于 1 时,实验值趋近于仿真值. 这是由于电磁微阀阀口开度较小时,手动装置很难精确控制阀芯的距离,测量误差有些过大. 但是手动实验装置为开关型电磁微阀各阀口开度下流量测量提供了一种方法。

5 结论

本文采用新型阀体材料高弹 PDMS, 设计和封装了一种面向气动微流控芯片的电磁微

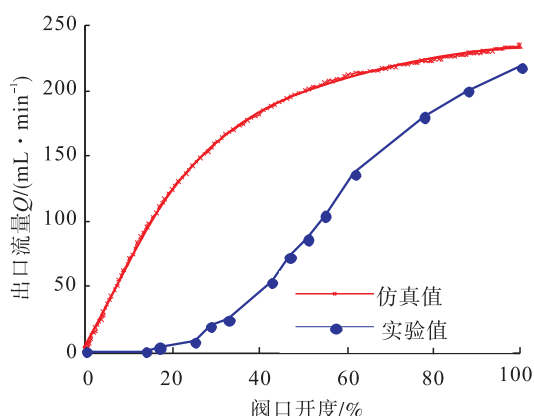


图 13 不同阀口开度下的出口流量特性
(阀口压差为 100 kPa)

Fig. 13 Flow rate characteristics of the
electromagnetic microvalve port under different
valve-openings (pressure differential is 100 kPa)

阀,封装尺寸仅为 30 mm × 17.5 mm × 9.8 mm. 利用 Fluent 二次开发功能 UDF 编程对电磁微阀流场进行的仿真表明,电磁微阀出口流量与理论模型趋于一致。

对电磁微阀的性能进行实验研究,在开关模式下控制驱动频率、PWM 模式下控制占空比和不同阀口开度下对电磁微阀流量进行测试. 将实验数据与仿真结果进行对比,发现:在驱动频率相等的情况下,电磁微阀流量与压差呈正比;当压差一定时,电磁微阀流量与驱动频率呈反比,电磁微阀平均流量与占空比呈正比;电磁微阀出口流量与阀口开度呈正比。

本文研究结果对电磁微阀的设计和测量具有较强的指导意义和参考价值,电磁微阀可以完全取代气动微流控芯片外部气路控制系统中常规电磁阀和阀组,提高气动微流控芯片系统的整体集成度,实现真正意义上的便携功能。

参考文献:

- [1] HONG J W,QUAKE S R. Integrated nanoliter systems [J]. Nature Biotechnology, 2003, 21 (10):1179.

- [2] ARACI I E,QUAKE S R. Microfluidic very large scale integration (mVLSI) with integrated micromechanical valves [J]. Lab on a Chip, 2012(12):2803.
- [3] SACKMANN E K,FULTON A L,BEEBE D J. The present and future role of microfluidics in biomedical research [J]. Nature, 2014, 507 (7491):181.
- [4] THORSEN T,MAERKL S J,QUAKE S R. Microfluidic large-scale integration [J]. Science,2002,298(5593):580.
- [5] LIU X,LI S. An electromagnetic microvalve for pneumatic control of microfluidic systems[J]. Journal of Laboratory Automation, 2014, 19 (5):444.
- [6] ANJEWIERDEN D,LIDDIARD G A,GALE B K. An electrostatic microvalve for pneumatic control of microfluidic systems [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering,2012,22 (2): 025019.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [8] HOLZBOCK W G. Electromagnetic actuator servo valves [C] // Proceedings of the Forth National Fluid Power Systems and Controls Conference. [S. l.]:[s. n.],1977.
- [9] 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.
- [10] 丁玉红. 一种小型直流电磁铁的结构设计[J]. 机电元件,2008,28(4):34.
- [11] 张振,章巧芳. 高压喷嘴的射流仿真研究[J]. 机电工程,2013,30(2):185.
- [12] BINTORO J S,HESKETH P J. An electromagnetic actuated on/off microvalve fabricated on top of a single wafer[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005 (15): 1157.
- [13] NGUYEN T T. One-cycle-controlled PWM for on-off valve and pneumatic actuation system [D]. Irvine:University of California,2005.