

磁力弹簧式气体隔膜泵的研究

伊延吉¹,王桂龙¹,王洪臣¹,杨志刚²

(1. 长春工程学院 工程训练中心,吉林 长春 130012;2. 吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025)

摘要:提出了利用磁力弹簧构造气体隔膜泵,并对气体隔膜泵的具体结构与工作原理进行阐述。对气体隔膜泵的核心部件压电振子、被动截止阀等进行选择和设计;对磁力弹簧结构进行分析,通过理论计算确定磁力弹簧的轴向力与轴向间隙的关系;通过实验方法,对不同阀口直径气体隔膜泵的输出流量与压力进行验证。结果表明,磁力弹簧构造气体隔膜泵能大幅提高泵体容积变化率,磁力弹簧能提供很好的刚度,输出流量、压力与同类气体泵相比大幅提高。

关键词:磁力弹簧;气体隔膜泵;压电振子

中图分类号:TM38;TH137.33

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.05.025

Research on Magnetic Spring Gas Diaphragm Pump

YI Yanji¹, WANG Guilong¹, WANG Hongchen¹, YANG Zhigang²

(1. Engineering Training Center, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The gas diaphragm pump with the magnetic spring structure is proposed, and the specific structure and operating principle of the gas diaphragm pump are presented. The core component of the gas diaphragm pump, including piezoelectric vibrator, passive cut-off valve, etc. have been chosen and designed. The structure of magnetic spring is analyzed. The relationship between the axial force and axial clearance of the magnetic spring has been determined through the theoretical calculation. The output flow and pressure of the gas diaphragm pump with different valve mouth diameters have been verified. The result shows that the gas diaphragm pump with the magnetic spring structure can greatly improve the volume change rate of the pump body, and the magnetic spring has excellent rigidity. Compared with the similar gas pump, the output flow and pressure have been significantly improved.

Key words: magnetic spring; gas diaphragm pump; piezoelectric vibrator

0 引言

气体隔膜泵用来对流体的输送,近年在微机电系统、航空航天、医药生物、精细化工等领域得到了越来越广泛的应用^[1-6]。按照驱动方式区分,气体隔膜泵主要包括凸轮机构与压电振子驱动两种。但二者都有很大的缺陷。凸轮驱动隔膜泵的结构复杂、控制难度大。压电振子驱动隔膜泵泵腔容积变化率低,压电陶瓷易裂碎。严重制约气体隔膜泵的应用^[7-12]。

本文利用磁力弹簧具有很好的悬浮刚度,提出利用磁力弹簧构造气体隔膜泵,能够很大幅度提高泵腔泵送压缩气体效率。同时可以使泵的结构简化,可靠性以及稳定性进一步提高。

1 气体隔膜泵结构设计与工作原理

气体隔膜泵是根据压电振子激励振动,促使隔

膜大幅振动,泵腔的体积发生改变,从而实现吸气排气往复变化,完成对气体的输送。

气体隔膜泵主要包括压电振子、隔膜、固定磁铁、浮动磁铁、过渡弹簧调整片、配重块构成的振动系统,具体结构如图1所示。

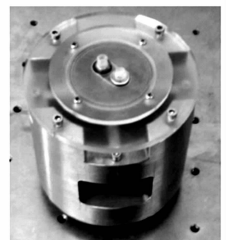
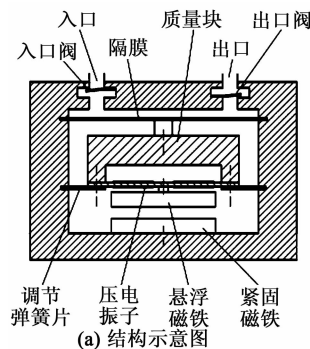


图1 结构示意图及实物图

收稿日期:2017-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50735002)

作者简介:伊延吉(1982-),女,吉林省长春市,讲师,主要从事压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械的研究。E-mail:30116085@qq.com。

在交变电压作用下,压电振子与振动系统固有频率一致时,形成往复振动形变,振动系统处于共振状态,此时配重块带动与之相连的隔膜交变振动,在振动过程中形成两个被动截止阀交替开启与关闭,泵腔的体积按照一定规律做周期变化,在泵腔内对气体定向驱动。由图 1 可知,隔膜泵的工作过程:

1) 吸气状态。压电振子振动方向为向上振动,压电振子边缘弹簧调整片带动配重块向下移动,同时带动隔膜,此时泵腔体积增大,压力变低,入口阀腔体内存在压力差,入口阀开启,出口阀关闭,泵腔内吸入气体,完成吸气过程。

2) 泵气状态。压电振子振动方向为向下振动,压电振子边缘弹簧调整片带动配重块向上移动,同时带动隔膜,此时泵腔体积变小,气体被压缩,压力变高,腔内压力大于腔外压力,出口阀开启,入口阀关闭,气体流出泵腔,完成泵气过程。

气体隔膜泵在工作中,磁力弹簧必须要有足够的刚度,才能实现气体隔膜泵对气体的吸气、泵气往复精密控制。

2 磁力弹簧结构与轴向力分析

采用永磁体构造磁力弹簧,如图 2 所示。主要包括两个环形永磁体,与永磁体相连接的磁力座,保证两个永磁体同心、并且能沿轴向移动的连接轴。当两永磁体同性磁极相对时,弹簧性质为压力弹簧;异性磁极相对,性质为拉力弹簧。弹性形变方向沿着连接轴移动。

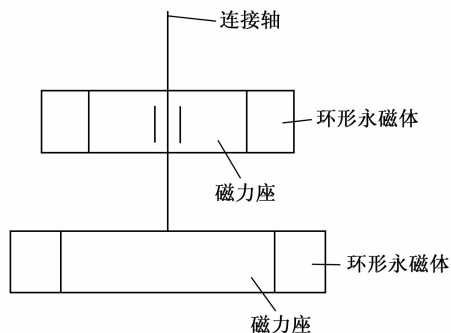


图 2 磁力弹簧结构示意图

根据磁荷观点建立磁力弹簧的数学模型,依据磁库伦定律,确定两个磁荷 q_{m1} 、 q_{m2} 之间磁力 F ,即

$$F = k \frac{q_{m1} \cdot q_{m2}}{r^3} \cdot r_{12} \quad (1)$$

式中: k 为一比例常数; q_{m1} 、 q_{m2} 为单位点磁荷数值,对应 m 为点磁荷磁量; r 为两点磁荷间距离; r_{12} 为点磁荷 q_{m1} 和 q_{m2} 之间的矢量。磁力弹簧的数学模型如图 3 所示。

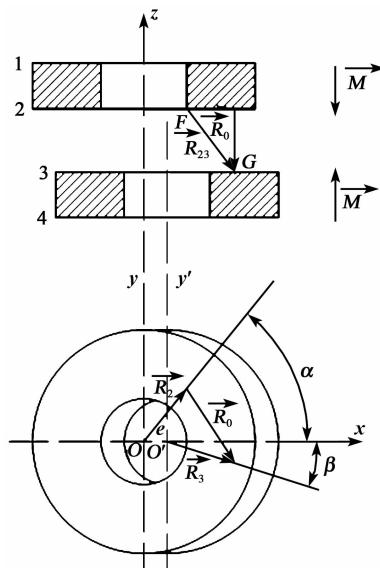


图 3 磁力弹簧的数学模型

图 3 中, r_2 、 α 为端面 2 上任一点的极坐标, r_3 、 β 为端面 3 上任一点的极坐标, e 为两环形磁铁轴线间距, R 为对应半径。

将环形永磁体经过网格划分,在圆周径向进行 S 个扇形分割,沿环向 N 个圆环分割,这样每个环形磁面就形成了 $S \times N$ 个小单元。用 $D(i, j)$ 来表示每个磁荷小单元,如图 4 所示。

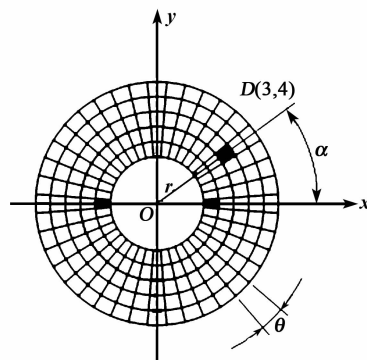


图 4 环形永磁体网格划分表面磁荷

图 4 中, $D(3,4)$ 代表径向第 3 层、环向第 4 层, r 、 α 为该层极坐标。

如图 3 所示,两个永磁体端面分别为 2、3,其上磁荷单元分别用 $D(i, j)$ 、 $D(k, l)$ 表示,其作用力可表示

$$F_{23} = \sum_{k=0}^{N_3-1} \sum_{l=0}^{S_3-1} \sum_{i=0}^{N_2-1} \sum_{j=0}^{S_2-1} \frac{B_r^2}{4\pi\mu_0} \cdot f(r_2[i], r_3[k], \alpha[j], \beta[l]) \cdot \nabla S_2[i] \cdot \nabla S_3[k] \quad (2)$$

式中: f 为磁荷在磁场中的作用力; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/m}$ 为常数; r_2 、 r_3 为对应极径; α 、 β 为极径夹角; B_r 为剩余磁感强度; $\nabla S_2[i]$ 、 $\nabla S_3[k]$ 为第 2、3 层小单元面积。

本文取 $N=8, S=100$ 。永磁体内径为 $\varnothing 15\text{ mm}$, 外径为 $\varnothing 35\text{ mm}$, 厚为 5 mm , 材质为烧结型钕铁硼牌号 N35, $B_r=1.2\text{ T}$ 。

选择 Matlab 软件进行曲线拟合, 拟合函数为 $f(x)=110e^{(-0.626\ 2x)}+64.93e^{(-0.141\ 6x)}$ (3)

对式(3)求导得磁力弹簧轴向刚度和轴向间距之间的表达式为

$$f'(x)=-0.626\ 2\times 110e^{(-0.626\ 2x)}-0.141\ 6\times 64.93e^{(-0.141\ 6x)}\tag{4}$$

由式(4)得到磁力弹簧轴向间距与轴向力关系, 如图 5 所示。

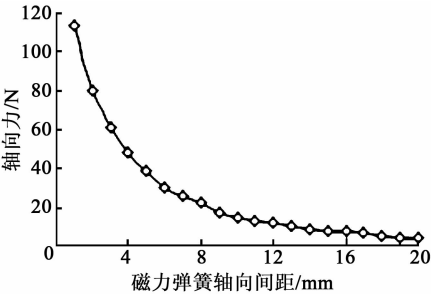


图 5 轴向间距与轴向力

由图 5 可知, 两永磁体间距的改变, 其相应轴向力也改变, 二者之间总存在一个对应关系, 保持磁力弹簧的稳定性, 选择合适的轴向间距, 在气体隔膜泵工作中, 能够提供稳定的刚度, 保证气体隔膜泵正常工作。

3 关键部件的选择与设计

3.1 压电振子选择与设计

压电振子是气体隔膜泵提供振动的原件, 本文采用压电振子为圆形轴对称结构, 且粘接后的压电陶瓷与金属基板同心, 结构如图 6 所示。图中, h_b 为基板厚度, R 为膜片工作半径, R_0 为硬心半径, h_p 为压电陶瓷厚度。

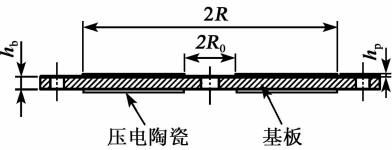


图 6 压电振子结构图

表 1 为压电振子具体尺寸、选用材料及参数。图 7 为压电振子实物。

表 1 压电振子结构参数表

组成	材料	内径/mm	厚度/mm
压电陶瓷	PZT-5	$\varnothing 8$	0.6
基板	65Mn	$\varnothing 4$	3.0
组成	外径/mm	弹性模量/GPa	泊松比
压电陶瓷	$\varnothing 60$	63	0.32
基板	$\varnothing 80$	197	0.80

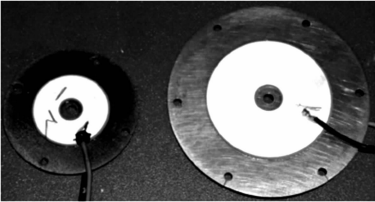


图 7 压电振子实物图

3.2 阀的选择与设计

压电泵一般使用的被动截止阀包括球形阀、轮式阀、悬臂梁阀等。本文采用轮式阀来构造气体隔膜泵, 如图 8 所示。

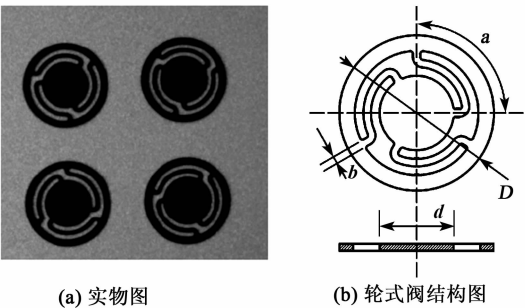


图 8 轮式阀结构图与实物图

本文确定的阀口直径 $d_0=5.5\text{ mm}$ 、 6.0 mm 、 6.5 mm , 设置输入电压为 200 V , 测量其输出流量和输出压力。

4 气体隔膜泵性能测试

本文设计并构建了气体隔膜泵测试系统(见图 9), 检验气体隔膜泵的工作性能, 对气体隔膜泵的输出流量和压力进行测量。测试实验设备包括: 气体接收器、电子称、信号发生器 AG1200、烧杯、继电器、功率放大器 7058、胶管及标尺。

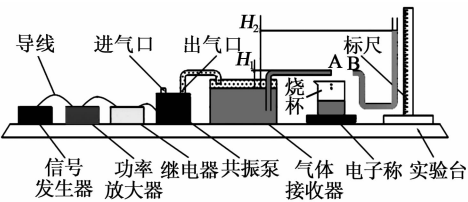


图 9 气体隔膜泵

由图 9 可知, 气体隔膜泵型腔体积发生改变, 输出气体进入气体接收器, 此时, 气体接收器内的压力会出现升高现象, 如果压力升高值 Δp 大于水柱高度压力值 H_1 时, 水通过气体接收器进入烧杯, 通过继电器对气体隔膜泵的工作时间进行控制, 利用电子称测出烧杯内水的质量, 通过计算流出水的流量可得共振泵的输出气体流量; 由于 A 和 B 两个管口相连, 水柱高度 H_2 的压力值也就是压电泵的输出压力。气体隔膜泵输出流量会受 H_1 影响, 应尽量减小 H_1 ; 同时, 气体接收器内压力升高, 会影响水对空气中的

溶解率,使之升高。图 10 为实验装置实物。

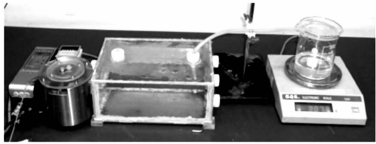


图 10 实验装置实物图

本文在确定 $d_0=5.5\text{ mm}$ 、 6.0 mm 、 6.5 mm 的前提下,在输入电压为 200 V 时,对其输出流量和输出压力进行测量,得到流量、压力与频率关系曲线分别如图 11、12 所示。

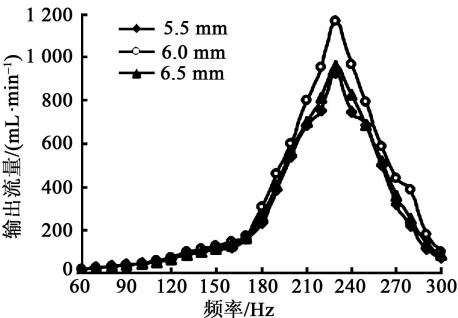


图 11 输出流量与频率的关系曲线

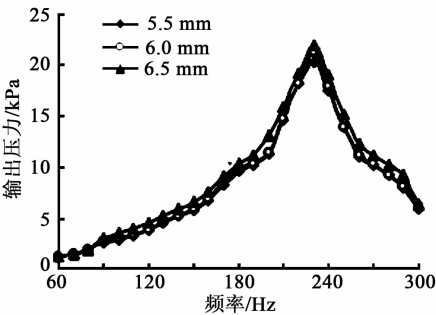


图 12 输出压力与频率的关系曲线

对流量和压力测试实验结果分析,流量与压力达到最大值时,其频率约为 230 Hz 。

由图 11 可知,当频率由小逐渐增大,最后达到 230 Hz 时,气体隔膜泵输出流量随频率增加而增加;当频率高于 230 Hz 时,气体隔膜泵输出流量随频率增加而减小。按照不同的 d_0 ,输出流量如表 2 所示。

表 2 d_0 不同时的流量输出值(230 Hz)

d_0/mm	5.5	6.0	6.5
输出流量/ $(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$	925	1 165	962

由图 12 可知,当频率小于 230 Hz 时,气体隔膜泵输出压力随频率增加而增加;当频率高于 230 Hz 时,气体隔膜泵输出压力随频率增加而减小。按照不同的 d_0 ,输出压力如表 3 所示。

表 3 d_0 不同时的压力输出值(230 Hz)

d_0/mm	5.5	6.0	6.5
输出压力/kPa	20.30	21.30	21.98

通过对表 2、3 数据的综合对比, $d_0=6.0\text{ mm}$

的气体隔膜泵输出性能最佳。

通过上述实验结果与其他类型压电泵对比,磁力弹簧气体隔膜泵输出流量和压力有很大幅度提高。

5 结论

本文设计了一种磁力弹簧结构的气体隔膜泵,经过理论分析及实验得出以下结论:

1) 利用磁力弹簧悬浮结构,通过调整弹簧垫片,能够实现隔膜的往复运动改变型腔的体积,实现对气体的泵送。

2) 磁力弹簧轴向悬浮力与轴向间距有固定的比例关系,气体隔膜泵在工作中具有很好的刚度。

3) 选用被动截止阀阀口直径 $\varnothing 6\text{ mm}$ 构造的气体隔膜泵流量与压力能达到最佳。

参考文献:

[1] 阙君武,杨志刚,唐可洪,等.新结构药品输送压电泵的泵送特性[J].生物医学工程学杂志,2004,21(2):297-301.

[2] 吴博达,鄂世举,杨志刚,等.压电驱动与控制技术发展与应用[J].机械工程学报,2003,39(10):79-85.

[3] 姜德龙,程光明,孙晓峰,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,2010,3(44):82-89.

[4] 王洪臣,李锬,吴波,等.基于超声波悬浮支撑的高速电机的设计[J].机床与液压,2016,44(3):78-81.

[5] 孙晓峰,李欣欣,杨志刚.带整体开启阀的双腔串联压电薄膜泵[J].吉林大学学报,2006,36(4):529-533.

[6] 阙君武.悬臂梁阀压电泵的设计理论与试验研究[D].长春:吉林大学,2003.

[7] 王洪臣,杨利,杨志刚,等.超声振动承载气膜对电机转子悬浮支撑与减摩的研究[J].润滑与密封,2015,40(12):66-70.

[8] 杨志刚,孙晓峰.双腔串联两阀与三阀压电泵的性能研究[J].光学精密工程,2007,15(2):219-223.

[9] 阙君武,曹仁秋,杨志刚,等.压电薄膜泵结构设计与性能分析[J].压电与声光,2002,24(5):368-371.

KAN Junwu, CAO Renqiu, YANG Zhigang, et al. Structure design and performance analysis of a piezoelectric pump [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2002,24(5):368-371.

[10] 彭太江,阙君武,杨志刚,等.圆形压电振子弯曲变形数值模拟与实验[J].中国机械工程,2009,20(16):1987-1991.

[11] 王兴元.磁力弹簧式共振型压电气泵研究[D].长春:吉林大学,2012.

[12] 王洪臣,杨志刚,刘磊.基于轴向支撑超声波悬浮高速电机的研究[J].压电与声光,2015,37(5):833-837.

WANG Hongchen, YANG Zhigang, LIU Lei. Based on axial support study on ultrasonic levitation high-speed motor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5):833-837.