

# 阀芯对中状态对磁自锁阀静态吸力的影响

陈 铭, 王春民, 赵双龙

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:**根据磁自锁阀的工作原理和结构特点,磁自锁阀的阀芯在永磁场作用下始终处于偏置状态。由于与阀体导向面挤压接触,增加了阀芯与阀体间的摩擦,导致磁自锁阀动作寿命短于直动螺管电磁阀,主要研究了磁自锁阀阀芯的对中状态对静态吸力的影响。首先,阐明了磁自锁阀工作原理及磁路设计特点;然后,在阀芯完全对中条件下,建立并对比了磁自锁阀的磁路分割法数学模型和磁场有限元仿真模型,计算得到阀芯所受静态电磁吸力;最后,改变阀芯位置,使阀芯处于偏心状态,仿真计算得到不同偏心距下的静态电磁吸力,结合阀芯表面的磁感应强度的变化情况得出影响规律。结果表明:阀芯在偏心状态下,会受到沿径向的侧向磁力作用,即永磁铁作用的侧向永磁力或线圈作用的侧向电磁力,侧向磁力随着偏心距的增加而快速增大。在阀芯表面沉积非金属膜层的工艺方法,可调节对中状态,有效减小侧向磁力,使磁自锁阀具有更长的动作寿命。

**关键词:**磁自锁阀;偏心;静态吸力;磁路计算;电磁仿真

**中图分类号:**V432      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-9374(2022)05-0038-08

## Study on static suction characteristics of magnetic latching valve with centering of armature

CHEN Ming, WANG Chunmin, ZHAO Shuanglong

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** According to the working principle and structural characteristics of the magnetic latching valve, the armature is always at the eccentric state. Under the action of permanent magnet field, the armature contacts with the valve body guide surface, increasing the friction between the armature and the valve body, resulting in the operating life of the magnetic latching valve shorter than that of the direct-acting solenoid valve. This paper mainly studies the influence of centering of magnetic latching valve armature on static suction. Firstly, the working principle and magnetic circuit design characteristics of magnetic latching valve were expounded. Then, under the condition of complete centering of armature, the mathematical model of magnetic circuit segmentation method and the finite element simulation model of magnetic field of magnetic latching valve were established and compared, and the static electromagnetic force of armature was calculated. Finally, the position of the armature was changed to make the armature at an eccentric state. The static electromagnetic force under different eccentricity was obtained by simulation, and the influence law was obtained by combining the change of the magnetic induction intensity on the

收稿日期:2021-08-31;修回日期:2021-11-23

作者简介:陈铭(1997—),男,硕士,研究领域为火箭发动机阀门。

surface of the armature. The results show that the armature will be affected by the lateral magnetic force along the radial direction that the lateral permanent magnetic force generated by the permanent magnet or the lateral electromagnetic force generated by the coil. The lateral magnetic force increases rapidly with the increase of eccentricity. The process of depositing non-metallic film on the surface of the armature can adjust to the centering, effectively reduce the lateral magnetic force and prolong the operation life of the magnetic latching valve.

**Keywords:** magnetic latching valve; geometric eccentricity; static suction characteristics; magnetic circuit computation; electromagnetic simulation

## 0 引言

自锁阀广泛应用于液体火箭发动机、长期在轨航天器和深空探测器等,具有良好的节能效果。自锁阀根据自锁原理分为机械式自锁阀、介质力自锁阀和永磁式自锁阀<sup>[1-2]</sup>。永磁式自锁阀(简称磁自锁阀)相较于前两种自锁阀具有结构简单紧凑、响应快等优点而应用最为广泛。

永磁自锁电磁铁是磁自锁阀的核心组件,其设计水平直接决定了磁自锁阀的性能,永磁自锁电磁铁的研究将对设计具有重要指导作用。潘英朋、高蕾娜等给出了磁性双工位自锁电磁铁的磁路建模方法及磁路磁导的计算方法<sup>[3-4]</sup>。柳珊等的研究表明热变形纳米晶 Nd-Fe-B 磁体具有更加良好的磁性能,使用此材料制成的永磁环可有效降低阀门的质量与尺寸<sup>[5]</sup>。任志彬等研究认为软磁材料的磁感应强度饱和是自锁电磁铁的电磁吸力与电压的非单调关系的主要原因<sup>[6]</sup>。此外,安匝数、气隙宽度、驱动电压和吸合面积比等参数均是影响自锁电磁铁静、动态特性的重要参数<sup>[7-10]</sup>。文献[11-12]根据各参数对静、动态特性的影响程度分别开发了针对磁自锁阀的结构优化方法。

研究试验表明,磁自锁阀动作寿命一般不超过1万次,而直动螺管电磁阀动作寿命约为几万次,无摩擦电磁阀的寿命可达百万次<sup>[13]</sup>,具有明显的寿命差距。在寿命试验中,动作数千次后便出现明显的动作延迟或无法开关的动作故障,试验后检查发现阀芯表面及导向面有明显磨损和刮擦痕迹。本文认为造成该现象的原因为磁自锁阀阀芯在配合间隙内受侧向磁力处于偏心状态,在动作时的摩擦力较大,从而加速了表面的磨损。目前未见针对磁自锁阀阀芯处于偏心状态的静态吸力研究。

本文主要通过仿真对比分析磁自锁阀阀芯在完全对中状态和偏心状态下受到的静态吸力,研究偏心状态的阀芯受到的磁力以及偏心量对侧向磁力的影响。

## 1 磁自锁阀工作原理

图1为磁自锁阀在各种状态下的磁路示意图,其采用双线圈控制,永磁体置于两线圈之间形成恒定永磁场,提供自锁力,打开线圈或关闭线圈瞬间通电可产生控制磁场,控制阀门开启与关闭。

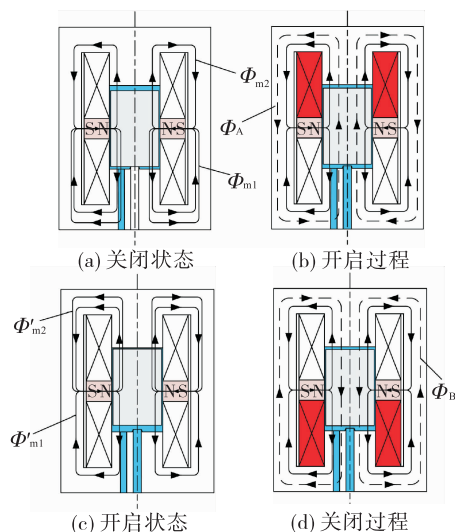


图1 磁自锁阀工作原理图

Fig.1 Operation principle of magnetic latching valve

图1(a)为磁自锁阀在关闭时的磁路,穿过下气隙的永磁通  $\Phi_{m1}$  大于穿过上气隙的永磁通  $\Phi_{m2}$ , 阀芯受到向下的永磁吸力,使阀芯保持关闭状态。图1(b)为阀门开启过程,打开线圈通电,产生控制磁通  $\Phi_A$  与在下气隙处永磁通  $\Phi_{m1}$  方向相反,相互抵消,与上气隙处永磁通  $\Phi_{m2}$  方向相同,相互叠加,形

成电磁合力,随电流逐渐增大,克服阻力,阀芯向上运动至最高点,阀门开启,打开线圈断电;图 1(c)为开启状态,上气隙永磁通  $\Phi'_{m2}$  大于下气隙永磁通  $\Phi'_{m1}$ ,永磁吸力方向向上,使阀芯自保持在开启位置。阀门关闭过程[见图 1(d)]与开启过程同理,关闭线圈通电,电磁合力向下,阀芯向下运动至关闭位置,阀门关闭,永磁吸力将阀芯紧紧压在阀座上。

## 2 阀芯完全对中状态下的静态电磁吸力

自锁电磁铁的静态电磁吸力一般指工作气隙固定且阀芯静止时,永磁体单独作用下的永磁吸力或线圈在恒定激励下输出的电磁吸力。在设计计算电磁吸力时不考虑阀芯存在偏心的理想情况,常用集中参数的磁路分割法进行初步的永磁力和电磁力估算,再通过磁场有限元法按实际结构参数建模确定自锁电磁铁的电磁性能。

### 2.1 磁路分割法及其数学模型

自锁电磁铁的磁路属于“动态式”磁路,主要表现为磁阻随工作气隙变化而变化,开/关线圈产生的瞬时外加磁场也影响着永磁体的工作点。现代稀土永磁体的退磁曲线为一条直线,且回复曲线与之重合,不必考虑非线性问题<sup>[14-15]</sup>,在磁路计算时可以将永磁体处理为一个恒定的等效磁势  $IN_m$  和一个线性的磁阻  $R_0$  的串联;线圈磁势由激励电流及匝数确定;工作气隙磁阻可按磁极形状分割圆柱体磁阻和圆筒形磁阻,非工作气隙磁阻可按圆筒形磁阻计算;导磁环、壳体等导磁零件的磁阻可按线性即类似非工作气隙磁阻处理,结合阀门结构示意图和工作原理,根据磁阻分布和串并联关系简化得到自锁电磁铁的等效磁路图,如图 2 所示。

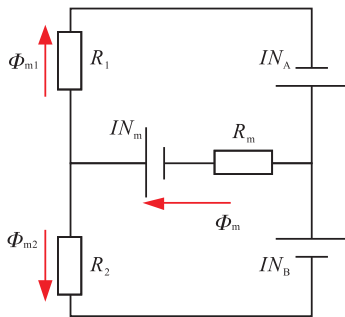


图 2 等效磁路图

Fig. 2 The magnetic circuit diagram

磁路中上、下两个控制线圈的磁势分别为  $IN_A$  和  $IN_B$ ,  $R_1$  和  $R_2$  分别为上、下磁路的等效磁阻,  $R_m$  为干路等效磁阻。根据磁路基尔霍夫二定理:闭合磁路的磁动势等于各段磁路上磁势降落之和,采用叠加原理求解上、下磁路的磁通得

$$\Phi_{m1} = \frac{IN_m R_2 + IN_A (R_m + R_2) - IN_B R_m}{R_1 R_2 + R_m (R_1 + R_2)} \quad (1)$$

$$\Phi_{m2} = \frac{IN_m R_1 + IN_B (R_m + R_1) - IN_A R_m}{R_1 R_2 + R_m (R_1 + R_2)} \quad (2)$$

式中:  $\Phi_{m1}$  为磁路通过工作气隙  $\delta_1$  的磁通, Wb;  $\Phi_{m2}$  为磁路通过工作气隙  $\delta_2$  的磁通, Wb。

假设工作气隙中的磁通密度是均匀的,由麦克斯韦电磁吸力基本公式可得到电磁合力  $F_d$  为

$$F_d = F_1 - F_2 = \frac{\Phi_{m1}^2}{2\mu_0 S_1} - \frac{\Phi_{m2}^2}{2\mu_0 S_2} \quad (3)$$

当式(1)和式(2)中线圈磁势  $IN_A$ 、 $IN_B$  均为 0 时,即磁路中只有永磁铁作用,电磁合力转化为永磁吸力。

### 2.2 磁场有限元法及其仿真模型

自锁电磁铁是一个同轴套管式结构,二维轴对称仿真模型能够完整反映其三维情况,考虑到后续研究中偏置阀芯,其为非轴对称模型,故采取三维建模仿真,图 3 为在低频电磁仿真软件 MagNet 中建立的自锁电磁铁三维模型的纵截面,使用软件提供的自适应网格划分工具对模型进行自动网格生成,在保证计算精度的同时减小计算量,对阀芯区域局部划分精细网格。

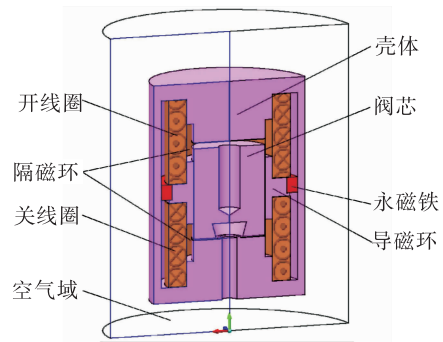


图 3 磁场有限元仿真模型

Fig. 3 Finite element simulation model

模型中永磁铁使用高性能钕铁硼永磁铁,牌号为 NdFeB 300/160,磁极内弧“N”,外弧“S”;阀芯、壳体、导磁环均使用高饱和磁感应强度软磁合金

BYR1,磁导率由  $B-H$  曲线定义;密封块、隔磁环和隔磁垫片的磁导率都很小,因此按真空材料处理。各模块的具体材料属性如表 1 所示。在 MagNet 软件中创建并自定义上述材料,将材料属性分别赋予对应结构的物理模型。仿真模型中不设置特殊边界条件,即考虑磁路中的漏磁,将求解区域外边界设置为气球边界。励磁源设置为控制线圈 910 安匝。

表 1 组件材料及属性		
Tab. 1 Material model attributes		
模型组件	材料	属性
永磁体	NdFeB 300/160	矫顽力 $H_c = 796 \text{ kA/m}$ 剩磁 $B_r = 1.08 \text{ T}$
阀芯、导磁环、壳体	BYR1	由 $B-H$ 曲线确定
线圈	铜	相对磁导率约为 1 匝数为 700
隔磁环、空气域	空气	相对磁导率约为 1

2.3 计算结果分析

使用磁路分割法数学模型和磁场有限元方法计算 4 种典型工况,即阀芯分别处于关闭和开启位置时,断电状态下的自锁力和通电状态下的电磁吸力。4 种工况分别代表磁自锁阀在断电状态下自保持开启、关闭状态和通电状态下开启、关闭瞬间,仿真计算结果如下。

选取 11 台产品进行吸力试验,利用微机控制弹簧拉压试验机测量上述 4 种工况的自锁力或电磁合力,测试结果与计算结果对比情况如表 2 所示。

表 2 4 种工况下电磁吸力计算结果			
Tab. 2 Simulation results of electromagnetic force for four cases			
工况	有限元法	磁路分割法	试验均值
关闭状态	23.7	25.2	23.5
开启状态	24.2	25.6	24.4
关闭瞬间	94.0	125.2	90.3
开启瞬间	102.9	120.7	95.3

对比两种计算方法结果及试验测量数据可得,磁路分割法较为保守,与试验数据误差较大,主要

是因为在计算时将铁磁阻线性化考虑以及对漏磁的估计不准。准确预测磁路构造分布与估算导磁体内磁感应强度及磁阻对磁路分割法的计算精度具有很大影响,在一定精度范围内,采用磁路分割法的计算结果准确度可以满足工程计算要求。磁场有限元法计算结果与试验数据比较接近。磁场有限元法将磁自锁阀离散单元化,得到其磁场分布情况,磁力线分布示出磁路结构,磁感应强度分布示出磁路工作原理。

图 4 为阀芯分别位于关位和开位时的表面磁感应强度,从图中可以看出磁感应强度呈上下高、中部低的层状分布;由磁路结构确定,磁通从阀芯中部进入,再从上下两端离开,因此磁感应强度在阀芯上下端面集中而高于中部;在关位时下侧气隙小于上侧,导致磁感应强度在小气隙侧更大;此外在导磁环与隔磁环交界处,磁感应强度由于散磁通的影响而有所增加。开位时的磁感应强度与关位时的正好相反,这是由于上侧工作气隙小于下侧气隙。

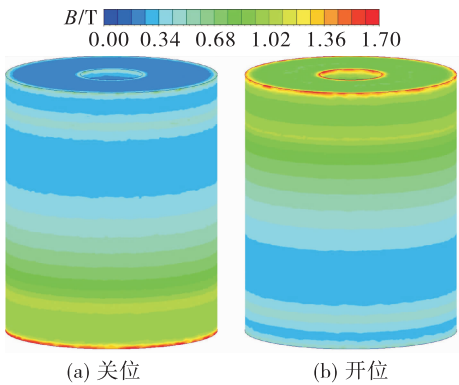


图 4 阀芯完全对中时的表面磁感应强度云图  
Fig.4 Magnetic induction intensity on the surface of armature

图 5 为通过磁场有限元法得到的 4 种工况的磁力线分布与磁感应强度分布。磁力线分布明确反映了磁路结构,图 5(a)、图 5(b)中,永磁场通过壳体与导磁环形成上下两个包围隔磁环与线圈的环形闭合磁路,且更多地穿过气隙较小的一侧。永磁体位置布置合理,磁路内没有明显磁饱和的情况,磁力线较好地被约束在磁路内。图 5(c)、图 5(d)中磁力线包围激励线圈分别形成对应的关闭磁回路和开启磁回路,磁路内磁力线数量明显增加,由



于控制磁场与极化磁场相互叠加,磁路并不稳定,而有部分磁力线逸出磁路,产生一定漏磁。磁感应强度主要集中在磁通面积较小的软磁合金壳体外部和最小工作气隙处。在断电状态下,永磁体作为唯一的励磁源,磁感应强度在小工作气隙处大于大工作气隙处,由此形成自锁力。同时,主磁路中磁感应强度基本处于  $0.6 \sim 1 \text{ T}$ ,在此范围内软磁合金

BYR1 具有较大磁导率,从而可获得较大的自锁力。在通电状态下,磁路中的工作气隙和壳体外部出现明显磁饱和,在磁路转角过渡处亦存在局部磁饱和,隔磁角度对吸力存在重要影响<sup>[16]</sup>。磁场有限元法的仿真结果中,由磁力线分布验证了磁路分割法中对磁路结构的准确建模;由磁感应强度的分布情况验证了计算铁磁导时按线性处理的合理性。

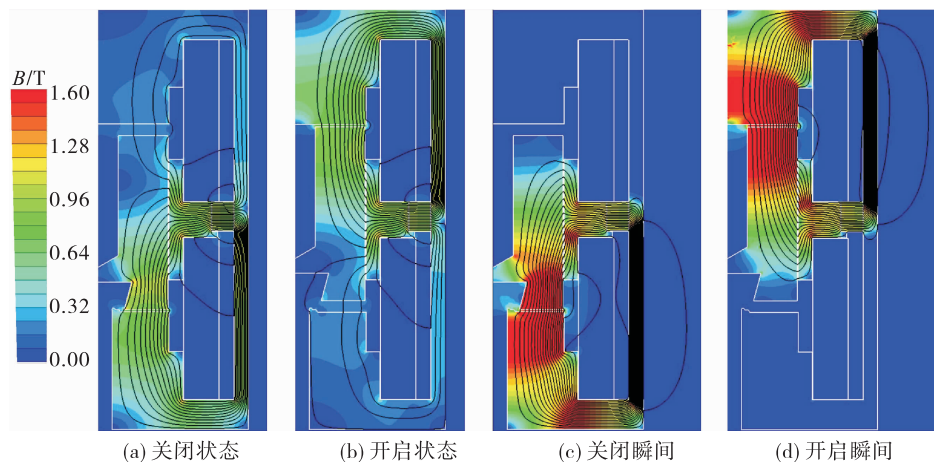


图 5 有限元法计算的磁力线分布及磁感应强度分布

Fig. 5 Simulation results of static electromagnetic field simulation

### 3 阀芯偏心状态下的静态电磁吸力

阀芯的偏心状态如图 6 所示,阀芯与导向面间的装配关系为间隙配合,单边间隙大小在  $0.03 \sim 0.035 \text{ mm}$  之间。阀芯在装配入阀体内便会整体偏移至一侧,与导向面相互接触,导致偏心侧的气隙减小,背离偏心侧气隙增大。

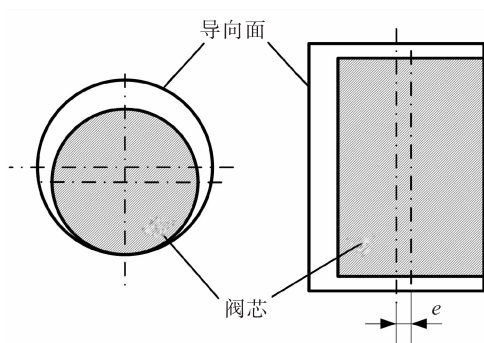


图 6 阀芯偏心示意图

Fig. 6 The schematic diagram of eccentric armature

定义偏心距  $e$  为阀芯横截面圆心至导向面圆心

的距离。根据上文中的仿真结果,磁自锁阀在关位和开位的磁场基本一致,仅方向相反,因此下面以关位为研究状态。

#### 3.1 阀芯偏心状态下的永磁吸力

阀芯在偏心状态下会与导向面直接接触,但是在 MagNet 软件中,所有导体不得接触且必须完全包围在空气域内,因此模型中阀芯与导向面的接触位置留有  $0.001 \text{ mm}$  的间隙,并在导向面内建立包围阀芯的圆柱体 InnerAir 区域,同时赋予该空气域表面向内生成的 2 层总厚度为  $0.001 \text{ mm}$  的边界层网格以保证阀芯完全包围于空气域内。材料参数设置与表 1 相同,建立阀芯在偏心状态下的三维仿真模型。

研究配合间隙的影响时,分别调整单边间隙为  $0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08 \text{ mm}$ ,偏心距  $e$  等于单边间隙宽度,采用磁场有限元法对不同偏心距下阀芯所受永磁吸力进行仿真计算。永磁吸力计算如图 7 所示,阀芯表面磁感应强度如图 8 所示。

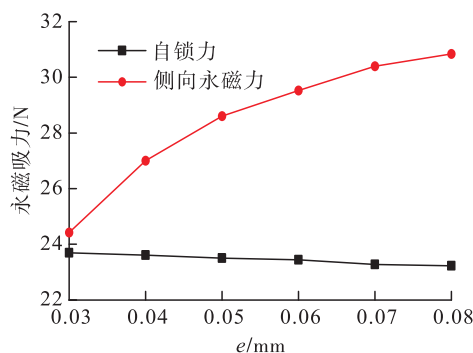


图7 不同偏心距下的永磁吸力变化

Fig. 7 Electromagnetic force with different eccentricity

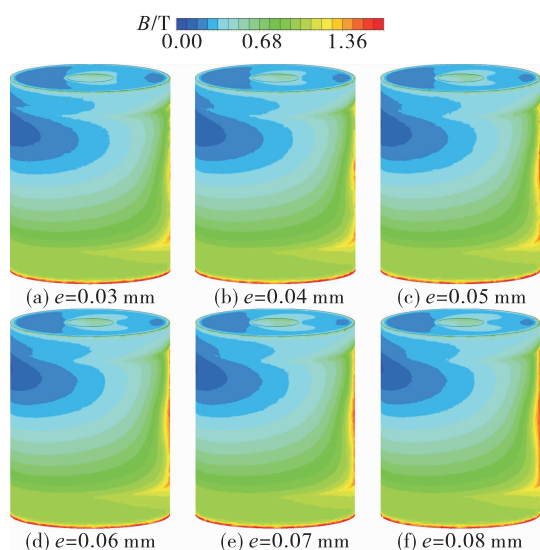


图8 关闭状态时不同偏心距下的阀芯表面磁感应强度云图

Fig. 8 Magnetic induction intensity on the surface of armature with different eccentricity in the closed state

由图7可知,磁自锁阀阀芯处于偏心状态且仅有永磁铁作用时,阀芯所受永磁吸力为沿轴向的自锁力和沿阀芯径向的侧向永磁力,侧向永磁力是由于阀芯偏心后,两侧气隙宽度不同而形成的。其中自锁力受偏心量的影响较小,随偏心量的增加有小幅降低,其原因为配合间隙增大,磁阻增大。侧向永磁力受偏心量影响较大,在单边配合间隙仅为0.03 mm时,侧向永磁力便有24.5 N,与自锁力相当,且在所选研究的配合间隙范围内基本按对数规律增大,在配合间隙小于0.06 mm时,侧向永磁力随偏心量增加快速增大;大于0.06 mm后,增加幅度减小,并逐渐趋于平缓。根据许闯等研究,阀芯

上下受力不均还将产生扭转力矩使阀芯倾斜<sup>[17]</sup>。

从图8中分析磁感应强度得出:阀芯偏心后,由于导磁环与隔磁环交接处的散磁通,将阀芯表面磁感应强度分为上中下3个部分。被导磁环包围的阀芯中部,磁感应强度在偏心侧的比例增加,在背离偏心侧的比例减小,两侧磁感应强度分布不均,产生侧向电磁力。此外,阀芯在工作气隙处的端面上,磁感应强度也显现出偏心侧高、背离侧低的分布,使阀芯受力更加复杂。随着阀芯偏心量的增加,磁感应强度在偏心侧逐渐增加,背离偏心侧逐渐减少,随着磁感应强度差的增加,阀芯侧向电磁力逐渐增加,使阀芯趋向偏心侧运动,并与导向面紧密贴合,增大偏心接触位置压强是导致阀芯卡滞的重要原因。

### 3.2 阀芯偏心状态下的电磁吸力

阀芯磨损过程发生在控制线圈通电,阀芯在电磁合力作用下运动的过程中。仿真模型为关闭状态,因此给开线圈设置激励电流分别为0、70、140、210、280 A,模拟电流不断增加的准静态开启过程中,阀芯所受线圈电磁力始终小于自锁力,阀芯始终保持在关闭位置上。针对上文中不同配合间隙的情况,仿真得到侧向电磁力随电流的变化如图9所示。

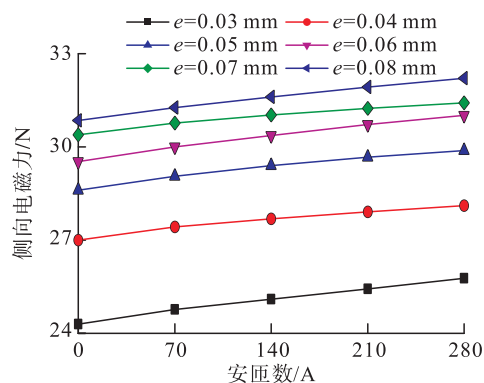


图9 侧向电磁力随电流的变化曲线

Fig. 9 Lateral electromagnetic force with different current

图9中侧向电磁力曲线表明:配合间隙在0.03 ~ 0.08 mm之间变化时,侧向电磁力变化趋势基本相同。在任意配合间隙内,侧向电磁力随安匝数的增加而增加。在安匝数为280 A时,线圈电磁吸力与自锁力基本相同,磁自锁阀响应时间很短,阀芯在

一瞬间完成位置转变,阀芯在运动过程中始终受到侧向电磁力作用。

### 3.3 侧向电磁力控制与偏心距控制方法

偏心状态的阀芯会受到侧向电磁力作用,使阀芯挤压导向面,加剧表面的磨损,是降低阀门寿命的重要原因。为提高磁自锁阀的动作寿命,必须减小侧向电磁力,减小摩擦。从前面的仿真中可以知道,侧向电磁力受偏心量的影响较大,减小偏心程度从而减小侧向电磁力是最直接有效的方法。如图 10 所示,在阀芯表面沉积非金属膜层后,偏心距  $e$  有所减小;同时,镀膜填补了一定的气隙空间,使偏心两侧的气隙差减小。非金属镀膜的磁导率很小,可将其视作空气域。

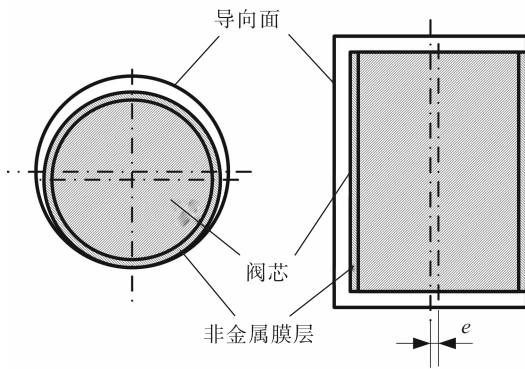


图 10 非金属镀膜示意图

Fig. 10 Schematic diagram of non-metallic coating

本文仿真了阀芯与导向面单边配合间隙为 0.05 mm 的状态情况,设置偏心距  $e$  分别为 0.01、0.02、0.03、0.04 mm,通过仿真得到侧向永磁力和自锁力如表 3 所示,阀芯表面磁感应强度分布如图 11 所示。

表 3 不同偏心距下电磁吸力计算结果

Tab. 3 Simulation results of electromagnetic force for different eccentricity

偏心距 $e/\text{mm}$	自锁力/N	侧向永磁力/N
0.05	-23.54	28.60
0.04	-23.50	10.29
0.03	-23.39	6.78
0.02	-23.27	4.18
0.01	-23.19	2.03

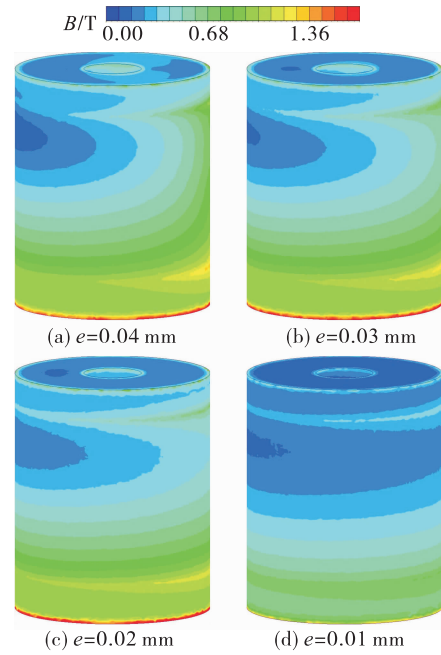


图 11 关闭状态时阀芯表面磁感应强度云图

Fig. 11 Magnetic induction intensity on the surface of armature in the closed state

从表 3 中可以看出,通过减小阀芯的偏心距可以显著减小侧向电磁力,从最大偏心度 0.05 mm 开始,每减小 0.01 mm 的偏心量,约减小 50 %侧向电磁力。从磁感应强度分布看出阀芯在偏心侧和背离侧的磁感应强度逐渐趋于均匀,呈现阀芯完全对中状态时的层状分布结构,因此侧向电磁力减小。

控制阀芯偏心量的几种方法如下。

1) 通过提高加工精度,减小装配间隙,可直接控制偏心量,但受加工经验限制,无法完全保证效果。此外,根据仿真结果,配合间隙较小的情况下,依旧有较大的侧向电磁力。

2) 调整电磁阀磁路,减小隔磁环尺寸,增加壳体导磁部分的尺寸,可使磁通更为均匀,减小衔铁扭转力矩<sup>[17]</sup>。

3) 使用挠性支撑片定位阀芯位置,实现阀芯无摩擦运动,此类阀门称为衔铁悬空式电磁阀<sup>[18-19]</sup>,具有动作寿命长的特点,但衔铁悬空式磁自锁阀的结构更加复杂<sup>[20]</sup>。

4) 通过在阀芯表面沉积非金属膜层,可利用膜层补偿一部分配合间隙和隔离阀芯与导向面,使导向面金属表面-阀芯金属表面摩擦副转变为导向面金属表面-膜层非金属摩擦副,削弱摩擦作用带来

的机械损伤,可有效提高阀门动作寿命。

本文中所研究的磁自锁阀已实现此工艺的成功应用,并通过1万次寿命试验考核,寿命试验后产品各项性能指标满足技术指标要求。

## 4 结论

本文利用电磁场有限元软件,分别对阀芯处于完全对中和偏心两种情况下的磁自锁阀进行了静态吸力仿真,研究了偏心距以及激励电流对侧向磁力的影响,得到了以下结论。

1) 自锁力几乎不受阀芯的偏心而变化,因此采用轴对称模型完全满足仿真设计要求。阀芯处于偏心状态时,永磁体和通电激励线圈均会对阀芯产生沿径向的侧向磁力,其方向指向偏心侧,会增加接触压强,加剧阀芯和导向面的磨损。

2) 侧向磁力受配合间隙的影响较大,随着磁自锁阀阀芯偏心量的增加,磁通向偏心侧集中,阀芯两侧的磁通差逐渐变大,侧向磁力逐渐增大。

3) 阀芯摩擦表面沉积非金属镀膜工艺可减小摩擦,并补偿配合间隙,减小偏心量。该工艺已成功应用于多种磁自锁阀并有效增加阀门动作寿命。

### 参考文献:

- [1] 王宝龄. 电磁电器设计基础(修订本)[M]. 北京:国防工业出版社,1989.
- [2] 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [3] 潘英朋,高汉平,刘刚. 磁性双位自锁电磁阀磁路设计与分析[J]. 液压气动与密封,2010,30(1):29-34.
- [4] 高蕾娜,唐茂,张跃华,等. 节能型电磁阀用双向定位式永磁操作机构与磁路建模[J]. 机械设计与制造,2019(6):186-188.
- [5] 柳珊,张晓东,陈健. 热变形纳米晶永磁环自锁阀锁闭特性研究[J]. 火箭推进,2013,39(3):83-86.  
LIU S, ZHANG X D, CHEN J. Latch characteristic of nano Nd-Fe-B magnet-ring latching valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(3):83-86.
- [6] 任志彬,王宗伟,常志鹏,等. 电磁阀用自锁电磁铁吸力与电压关系研究[J]. 推进技术,2016,37(7):1372-1379.
- [7] 张坤,梁慧敏,于海丹,等. 新型阀用含永磁电磁执行机构的设计与研究[J]. 电器与能效管理技术,2015(19):1-4.
- [8] 李志明,杨国华,李嘉琪. 基于 Ansoft 的永磁式电磁阀优化设计[J]. 机电工程技术,2018,47(11):40-44.
- [9] 张克鹏,蔡培裕. 电磁阀电磁力仿真与试验研究[J]. 制冷与空调,2020,20(9):26-28.
- [10] 张强,周炜,乔桂玉,等. 双工位自锁电磁铁的设计与仿真[J]. 火箭推进,2020,46(1):83-88.  
ZHANG Q, ZHOU W, QIAO G Y, et al. Design and simulation of a double station self-locking electromagnet[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(1):83-88.
- [11] BELLI Z, MEKIDECHE M R. Dynamic optimization of an axisymmetric linear electromagnetic valve actuator[C]//2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Monte Carlo, Monaco:IEEE,2013.
- [12] YANG Y P, LIU J J, YE D H, et al. Multiobjective optimal design and soft landing control of an electromagnetic valve actuator for a camless engine[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(3):963-972.
- [13] 黄爱清,曹明,唐妹芳,等. 一种无摩擦簧片式电磁阀的研制[J]. 火箭推进,2015,41(6):41-45.  
HUANG A Q, CAO M, TANG M F, et al. Development of non-friction S-spring valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(6):41-45.
- [14] 左全璋,胡双,左才科. 双稳态永磁操动机构结构设计和性能计算(I)[J]. 华通技术,2002(2):13-17.
- [15] 左全璋,胡双,左才科. 双稳态永磁操动机构结构设计和性能计算(II)[J]. 华通技术,2002(3):20-28.
- [16] 胡燕平,张瀚. 隔磁环参数对直流电磁铁电磁吸力影响研究[J]. 液压与气动,2016(6):46-49.
- [17] 许闯,尤罡. 电磁阀磁路结构对动作寿命的影响[J]. 火箭推进,2013,39(5):70-74.  
XU C, YOU G. Influence of magnetic structure of solenoid valve on its motion life[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(5):70-74.
- [18] 许闯,王强. 悬空衔铁式电磁阀中S形簧片的研制[J]. 火箭推进,2017,43(5):58-62.  
XU C, WANG Q. Development of S-shape spring in suspended armature solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(5):58-62.
- [19] 王立君,柳珊,唐妹芳. 一种新型 Bang-Bang 电磁阀的研制[J]. 火箭推进,2019,45(1):48-52.  
WANG L J, LIU S, TANG M F. Development of a new Bang-Bang solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(1):48-52.
- [20] LYNCH R. Common valve design for Space Shuttle payload propulsion system applications[C]//16th Joint Propulsion Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1980.