

基于能量回收原理的高速电磁阀仿真与试验研究^{*}

官长斌, 毛晓芳, 王 平, 蔡 坤, 张 良, 李恒建

(北京控制工程研究所, 北京 100094)

摘 要: 为了解决螺线管电磁阀开启响应和关闭响应难以同步提高的问题, 提出一种基于能量回收原理的高速电磁阀, 通过特殊的高刚度回复片弹簧及其与衔铁顶杆的微小间隙设计, 实现了密封力与回复力的解耦, 在不影响开启过程的情况下将衔铁动能转化为加速关闭的弹性势能。在分析了高速电磁阀工作原理基础上, 利用 Ansoft Maxwell 软件对其瞬态特性进行了仿真分析, 并对不同结构参数电磁阀的开关响应特性进行了对比试验研究。试验结果表明, 高刚度回复弹簧及其间隙 δ 的存在将高速电磁阀的关闭时间缩短了6ms左右, 而开启时间仅延长了0.3ms, 开关时间均可控制在5ms以内并且具有100万次以上的开关寿命。

关键词: 高速电磁阀; 开关响应时间; 电流曲线; 能量回收原理; 空间推进系统

中图分类号: V432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2020) 03-0668-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190045

Simulation and Experiment on High-Speed Solenoid Valve Based on Energy Recovery Principle

GUAN Chang-bin, MAO Xiao-fang, WANG Ping, CAI Kun, ZHANG Liang, LI Heng-jian

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to solve the problem that the opening response and the closing response of solenoid valve cannot be improved synchronously, a high-speed solenoid valve based on the energy recovery principle is proposed, which adopts a special high-stiffness return spring that has a small gap with the armature. It decouples the sealing force and the closing force. The kinetic energy of the armature is converted into the elastic potential energy that accelerates the armature closing process without affecting the opening process. Based on the analysis of the working principle of high-speed solenoid valve, its transient characteristics were simulated by Ansoft Maxwell and the switching response characteristics with different structural parameters were tested. The presence of both the high stiffness return spring and its gap δ could shorten the closing time by about 6ms, while the opening time is only extended by 0.3ms. The switching time can be controlled within 5ms and has more than 1 million switching times.

Key words: High-speed solenoid valve; Switch response time; Current curve; Energy recovery principle; Space propulsion system

^{*} 收稿日期: 2019-01-15; 修订日期: 2019-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (51805026)。

通讯作者: 官长斌, 博士, 高级工程师, 研究领域为空间流体控制技术。E-mail: guanchangbin@163.com

引用格式: 官长斌, 毛晓芳, 王 平, 等. 基于能量回收原理的高速电磁阀仿真与试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(3): 668-674. (GUAN Chang-bin, MAO Xiao-fang, WANG Ping, et al. Simulation and Experiment on High-Speed Solenoid Valve Based on Energy Recovery Principle[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(3):668-674.)

1 引言

螺线管电磁阀由于结构简单、可靠性高、控制方便等优点,广泛应用于空间推进系统的流体控制中,例如冷气推力器、化学推力器和电推进氙气供给系统等^[1]。电磁阀的开关响应时间是其在空间推进系统应用的核心指标,因为它直接决定了空间推进系统的控制精度和响应速度。为了适应“超精”、“超稳”、“超快”卫星平台对高精度空间推进系统的需求,开展高速电磁阀原理创新及设计方法研究具有重要的现实意义。

国内外学者对提高螺线管电磁阀动态响应速度开展了大量的理论及试验研究,大致可以分为三类:第一类是通过结构、磁路或材料性能优化来改善电磁阀的响应性能;第二类是设计特殊的驱动线路来提高电磁阀的开关速度;第三类是通过结构或原理上的创新来设计高速电磁阀。Kajima等^[2]研究了线圈本身的参数对电磁阀动态性能的影响,如线圈直径和匝数等,并给出了实现电磁阀快速开关的有效方法。Yang等^[3]基于有限元方法对电磁阀的衔铁和线圈结构进行了优化,并提出了一种衔铁退磁方法来加速衔铁释放。Tao等^[4]通过采用不同 $B-H$ 曲线的软磁材料并调整电磁阀结构参数来优化磁力线分布,实现电磁阀的快速响应和低功耗。Passarini等^[5]研究了衔铁质量对于电磁阀动态响应性能的重要性,并给出了衔铁质量的优化设计标准。Wang等^[6]采用新型Al-Fe软磁合金材料并对磁路进行了重新设计,采用电流跟踪的脉宽调制(Pulse-width modulation, PWM)控制方法实现了电磁阀快速响应。Wang等^[7]通过电磁阀动态响应仿真分析,确定了影响动态响应速度的四种主要因素,分别是启动电流、稳态电流、弹簧预紧力和弹簧刚度,并对以上因素对开启时间和关闭时间的影响效果进行了单独分析。文献[2-7]属于第一类改进措施,该类措施效果往往有限,并且对于特殊用途电磁阀(如空间推进系统电磁阀)的软磁材料需要考虑相容性而不能任意选择。Kajima等^[8]通过设计专门的线圈驱动电路,采用虚拟线圈预激励的方法实现电磁阀的快速启动。宋进^[9]采用PWM方式提高驱动电压幅值来缩短电磁阀开启动态过渡时间,同时控制电磁阀稳态过程的线圈电流来减少释放瞬时的电磁能从而缩短释返时间。III-Yeong Lee^[10]采用三电源型驱动电路来提高电磁阀响应性能。卜建国等^[11]以Peak/Hold型驱动方式为基础,对雪崩型和储能型两种泄流电路对电磁阀开关

响应速度的影响进行了详细分析和对比试验,并给出了结论。文献[8-11]属于第二类改进措施,均增加了控制系统的复杂性和成本,同时降低了系统可靠性。官长斌等^[12]采用永磁偏置力来缩短电磁阀的开启时间和关闭时间,提出了一种适用于空间推进系统的快速响应轴流式电磁阀。张榛等^[13]同样设计了一种基于永磁体偏置磁场的高速响应电磁阀,并利用有限元方法对设计方案进行了验证。针对电磁力及行程等常规因素无法同时提高电磁阀开启速度和关闭速度的问题,Kong等^[14]和江澎等^[15]均提出了一种并联线圈结构的电磁阀,仿真和试验均表明该方法可有效提高电磁阀开关响应速度。文献[12-15]属于第三类改进措施,此类改进措施效果明显,但是借助永磁偏置力的高速电磁阀装配可调节性差,而并联线圈结构必然增加产品重量。

本文从电磁阀自身结构出发,提出了一种基于能量回收原理的新型快速响应、无摩擦螺线管电磁阀,将电磁阀开启过程中衔铁动能转化为加速电磁阀关闭的弹性势能,实现了其开启速度和关闭速度的同时提高。基于以上思路,阐述了高速电磁阀的结构组成和工作原理,利用电磁仿真软件对不同结构参数的电磁阀响应性能进行了仿真分析,并对不同参数的电磁阀样机进行了对比试验研究。仿真和试验结果均验证了该原理的可行性,实际产品的开关响应时间均可达到5ms以内。该高速电磁阀的实现方式简单、有效,其设计理念和研究方法对高性能电磁阀的设计具有重要的参考价值。

2 设计原理

电磁阀的响应时间包括开启时间和关闭时间,提高电磁阀响应速度就要同时缩短开启时间和关闭时间。然而,电磁阀结构参数对于两者的影响是此消彼长的矛盾关系,这给高速电磁阀的设计带来了困难。驱动电压和弹簧刚度是影响电磁阀响应时间的主要因素。驱动电压升高,开启时间会由于安匝数增大而缩短,但是关闭时间会由于剩磁增大而增长;弹簧力增大,关闭时间缩短,但是开启时间会由于弹簧阻力增大而增长。此外,弹簧力不可无限增大,因为弹簧力同时提供阀口密封力,过大的密封力会损伤非金属密封面,降低电磁阀寿命。因此,解决开启响应与关闭响应相互耦合的矛盾关系,是实现高速电磁阀的核心所在。

针对电磁阀开启时间和关闭时间此消彼长的矛盾关系,提出了一种基于能量回收原理的新型快速

响应、无摩擦螺线管电磁阀,其结构如图1所示,包括带顶杆的衔铁、低刚度密封弹簧、高刚度回复弹簧、阀体、线圈、外壳、入口管路和出口管路。低刚度密封弹簧和高刚度回复弹簧均采用文献[16]中提到的S型片弹簧结构(如图2所示)。低刚度密封弹簧固定在衔铁和顶杆之间,依靠自身预变形量来提供电磁阀的密封力;顶杆左端细杆穿过高刚度回复弹簧的中心孔,左端细杆端面与高刚度回复弹簧保持间隙 δ 。阀体内孔与衔铁外圆间存在间隙,并不接触,实现了无摩擦设计。

本文提出的高速电磁阀设计核心为:设置一个与顶杆保持间隙 δ 的高刚度回复弹簧,其目的在于实现高速电磁阀较强的关闭回复力和较弱的密封力之间的解耦,在实现电磁阀快速开关的同时保证了电磁阀的寿命。该高速电磁阀具有如下优点:(1)高刚度回复弹簧和低刚度密封弹簧在衔铁两端将其悬挂起来,使得衔铁与阀体间不存在摩擦,进而消除了摩擦力对开启时间和关闭时间的影响。(2)由于间隙 δ 的存在,高刚度回复弹簧不会对电磁阀的开启产生阻力,但却会加速电磁阀的关闭过程。(3)高刚度回复弹簧仅提供衔铁回复力,密封力由低刚度密封弹簧提供,衔铁回复力的增大并未增大密封力,保证了产品的可靠性和寿命。

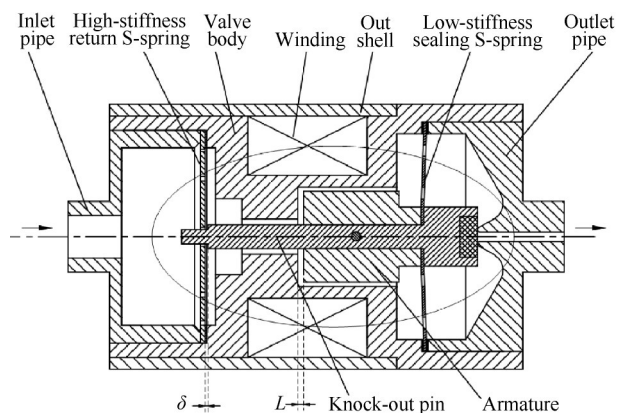


Fig. 1 Structure diagram of the high-speed solenoid valve

高速电磁阀的衔铁运动行程为 L ,运动过程总共可以分为四步,如图3所示。

开启起步阶段:当线圈通电后,衔铁从如图3(a)所示的关闭位置运动到如图3(b)所示的顶杆刚刚接触高刚度回复弹簧的位置,位移量为 δ 。

能量积累阶段:这个阶段是衔铁从图3(b)所示的位置运动到图3(c)所示的开启位置,总位移为 $L-\delta$ 。此阶段,衔铁开启过程中的动能转化为高刚度回

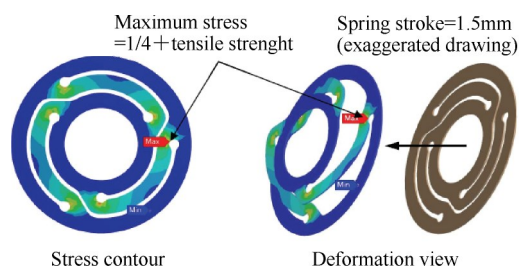


Fig. 2 S-shape spring^[16]

复弹簧的弹性势能,实现了能量的积累。

能量释放阶段:这个阶段是衔铁从图3(c)所示的开启位置运动到图3(b)所示的位置,总位移为 $L-\delta$ 。此阶段,高刚度回复弹簧的弹性势能转化为加速衔铁关闭的动能,同低刚度密封弹簧一起使电磁阀快速关闭。

关闭结束阶段:这个阶段是衔铁从图3(b)所示的位置运动到图3(a)所示的关闭位置,总位移为 δ 。此阶段中,衔铁在低刚度密封弹簧的单独作用下继续加速并最终到达关闭位置。

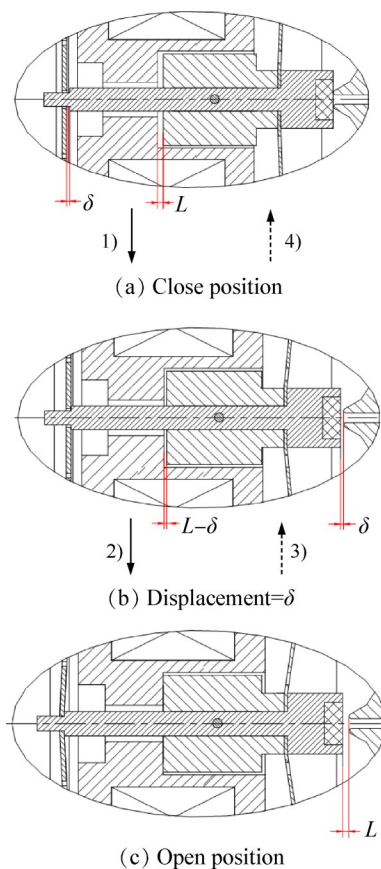


Fig. 3 Moving process of the high-speed solenoid valve

3 建模与仿真

电磁阀的开启时间和关闭时间可以通过电磁阀

在方波驱动电压作用下的线圈电流曲线获得^[17]。图 4 为电磁阀在方波驱动下(高电平时间为 15ms)的线圈电流曲线。当给线圈供电后,线圈电流逐渐增大,在 A 点衔铁的电磁力克服密封弹簧阻力开始运动;在衔铁运动过程中,线圈中会产生反电动势使电流急剧减小(出现如图 4 所示的拐点),直到衔铁速度变为 0,即衔铁到达开启位置的 B 点,线圈电流才继续增大直到稳态电流, B 点对应的时间 t_1 即为开启时间;同样,在线圈于 15ms 断电后,电流逐渐减小,到达 C 点时衔铁开始在弹簧力作用下运动,由于衔铁运动产生的反电动势使线圈电流不降反升,直到衔铁到达关闭位置的 D 点,线圈电流才继续下降直到 0, D 点对应的的时间减去高电平时间即为关闭时间 t_2 。因此,在仿真分析和试验研究中,只要获得电磁阀线圈上的电流曲线,就可以获得电磁阀的开启时间和关闭时间。

本节利用电磁仿真软件 Ansoft Maxwell 对高速电磁阀的动态响应进行分析。Ansoft Maxwell 是一款可进行静态和动态电磁仿真的有限元分析软件,包含二维和三维两种分析模式。考虑到本文提出的高速电磁阀为轴对称结构,故采用二维仿真模块对其动态特性进行分析,以通过仿真的线圈电流曲线获得其开启时间和关闭时间。图 5 为高速电磁阀在 Ansoft Maxwell 仿真软件中的二维仿真模型。

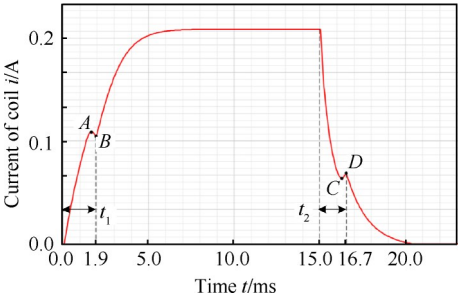


Fig. 4 Relation between current curve and response time^[17]

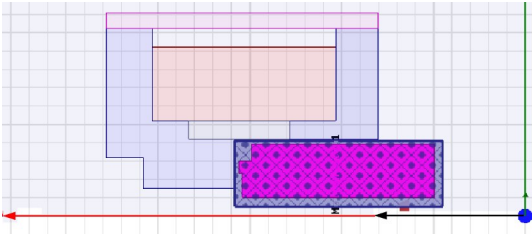


Fig. 5 Axisymmetric simulation model

在进行高速电磁阀瞬态特性仿真之前,首先要对衔铁的运动参数进行设置。根据第 2 节的衔铁运动过程分析,衔铁上的负载力可以通过如下分段函数进行描述

$$F_L = \begin{cases} -k_s(x + x_0) & x \leq \delta \\ -k_s(x + x_0) - k_R(x - \delta) & x > \delta \end{cases}$$

式中 F_L 为衔铁上的瞬态负载力, K_s 和 K_R 分别为低刚度密封弹簧和高刚度回复弹簧的刚度, x 为衔铁位移, x_0 为低刚度密封弹簧的预压缩量, δ 为高刚度回复弹簧与顶杆之间的间隙。

基于图 5 所示的仿真模型和上式负载力进行高速电磁阀的瞬态响应分析。为了保证阀口可靠密封,取密封弹簧刚度 k_s 为 18N/mm, 预压缩量 x_0 取 0.25mm; 衔铁位移 x 最大值为 0.2mm。为了验证本文提出的高速电磁阀原理的正确性,首先对不同刚度 k_R 的回复弹簧对电磁阀开关响应的影响进行了分析。

图 6 为驱动电压为 28V, 间隙 δ 取 0.05mm, 电磁阀分别采用 $k_R=20\text{N/mm} \sim 60\text{N/mm}$ 回复弹簧时的电流曲线, 曲线中提取的开启时间和关闭时间统计见表 1。通过仿真结果可以看出: (1) 随着回复弹簧刚度的增大, 电磁阀的关闭时间会随之缩短。这是因为回复弹簧刚度越大, 其积累的用于衔铁关闭的能量越大。(2) 回复弹簧刚度对启动时间不产生影响(均为 4ms)。这是由于间隙 δ 的存在, 衔铁在接触回复弹簧时已具备了足够大的动能来克服回复弹簧的阻力。

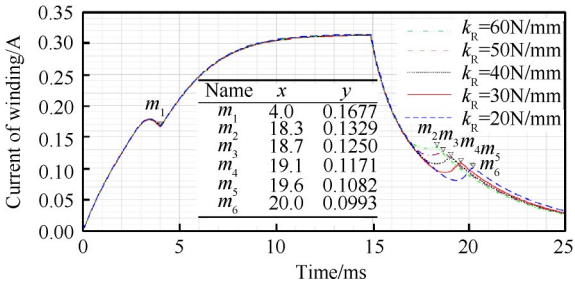


Fig. 6 Simulated current curve with different k_R

Table 1 Simulated response time with different k_R

δ/mm	$k_R/(\text{N/mm})$	t_1/ms	t_2/ms
0.05	60	4	3.3
0.05	50	4	3.7
0.05	40	4	4.1
0.05	30	4	4.6
0.05	20	4	5.2

然后,对间隙 δ 对电磁阀开关时间的影响进行了仿真分析,取回复弹簧刚度为 50N/mm。图 7 为无回复弹簧以及 δ 取 0.05mm 和 0.1mm 时的电磁阀电流仿真曲线。从图 7 所示的电流曲线上获得的开关响应时间见表 2。从图 7 和表 2 所示的仿真结果可以看出: (1) 高刚度回复弹簧的存在大大缩短了电磁阀的

关闭时间,并且关闭时间随间隙 δ 的减小而减小;间隙 δ 越小,回复弹簧的变形量越大,其积累的关闭能量也越大。(2)高刚度回复弹簧并不会对电磁阀的开启时间产生负面影响,始终维持在4ms附近。

以上仿真结果表明,本文提出的高速电磁阀在不影响开启时间的前提下,可以有效提高其关闭响应性能。因此,对于基于能量回收原理的高速电磁阀,只要将开启时间设计在预期范围内,关闭时间可以通过高刚度回复弹簧来进行调节。

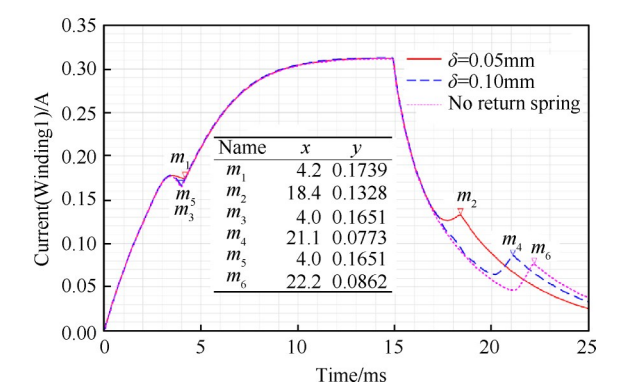


Fig. 7 Simulated current curve with different δ

Table 2 Simulated response time with different δ

Voltage/V	δ /mm	t_1 /ms	t_2 /ms
28	No return spring	4.0	7.2
28	0.10	4.0	6.1
28	0.05	4.2	3.4

4 试验与讨论

为了对本文提出的高速电磁阀设计思路的有效性进行验证,重点对高刚度回复弹簧及其间隙 δ 对电磁阀开关响应的影响进行了对比试验研究。对高速电磁阀施加不同驱动电压,通过示波器和非接触电流测量仪来采集电磁阀线圈上的电流曲线,以此获得不同驱动电压和结构参数下高速电磁阀的开关响应时间。

图8为基于能量回收原理的高速电磁阀原理样机,其线圈电阻为 86Ω ,匝数为1150,阀口直径为1mm。该电磁阀采用的低刚度密封弹簧刚度为18N/mm,高刚度回复弹簧刚度为50N/mm。为了验证高刚度回复弹簧及其间隙对高速电磁阀开关响应特性的影响,在装配过程中通过调节不同间隙 δ (无回复弹簧、 $\delta=0.02\text{mm}$, 0.06mm , 0.10mm),得到不同结构参数的高速电磁阀,并施加不同驱动电压(32V,28V,24V和20V)。通过示波器和非接触电流测量仪获得线圈

上的电流曲线并进行了整合对比,得到了不同驱动电压和间隙下的电磁阀电流曲线(如图9所示)。从图9中提取电磁阀开启时间 t_1 和关闭时间 t_2 ,并将其列在了表3中。为了更加清晰地显示不同电压和不同间隙 δ 下,电磁阀开关响应时间的变化趋势,将开启时间 t_1 和关闭时间 t_2 绘制在图10中。



Fig. 8 Prototype of the proposed solenoid valve

从图9,图10和表3所得测试结果可以得到如下结论:(1) $\delta=0.02\text{mm}$ 时,高速电磁阀的关闭时间大约比无高刚度回复弹簧时缩短了大约6ms,可见回复弹簧的存在显著改善了高速电磁阀的关闭响应特性。(2)任何驱动电压下,高速电磁阀的关闭时间均随着间隙 δ 的减小而缩短,这是因为 δ 越小,高刚度回复弹簧所积累的加速衔铁关闭的能量越多,本文提出方案的效果显而易见。(3)有无高刚度回复弹簧以及不同间隙 δ 下,高速电磁阀的开启时间均无明显变化(1ms以内),这验证了高刚度回复弹簧在加速电磁阀关闭的同时,并未对开启响应产生显著的阻碍作用;高刚度回复弹簧及其间隙的存在使高速电磁阀具备了“开启过程低阻力、关闭过程强动力”的特点。(4)相同间隙 δ 下,随着驱动电压的增大,开启时间会逐渐缩短,关闭时间会微弱延长,这是由于随着启动电压增大,通电时衔铁上电磁力增大,而断电时衔铁上的剩余磁能同样增大;开启时间的缩短量明显大于关闭时间增长量,这就说明本文所述高速电磁阀可以通过提高驱动电压来提高开启响应。

此外,由表3可以看出,经过间隙 δ 的优化设计,高速电磁阀的开启时间和关闭时间均可以控制在5ms以内,完全可以满足先进空间推进系统的应用需求。

此外,为了验证高速电磁阀的可靠性,对间隙 δ 取0.02mm的电磁阀样件进行了2MPa无水乙醇介质下的100万次寿命试验,每隔20万次测试一次开启时间 t_1 ,关闭时间 t_2 和内漏率 f ,测试结果见表4。在整个寿命过程中,高速电磁阀的开关时间和内漏率等性能稳定,开关时间均满足 $\leq 5\text{ms}$ 的要求,内漏率满足 $\leq 1\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 的要求。这就证明了本文提出的密封力与回复力的解耦方案在实现电磁阀快速响应的同时,保证了其高可靠性和长寿命。

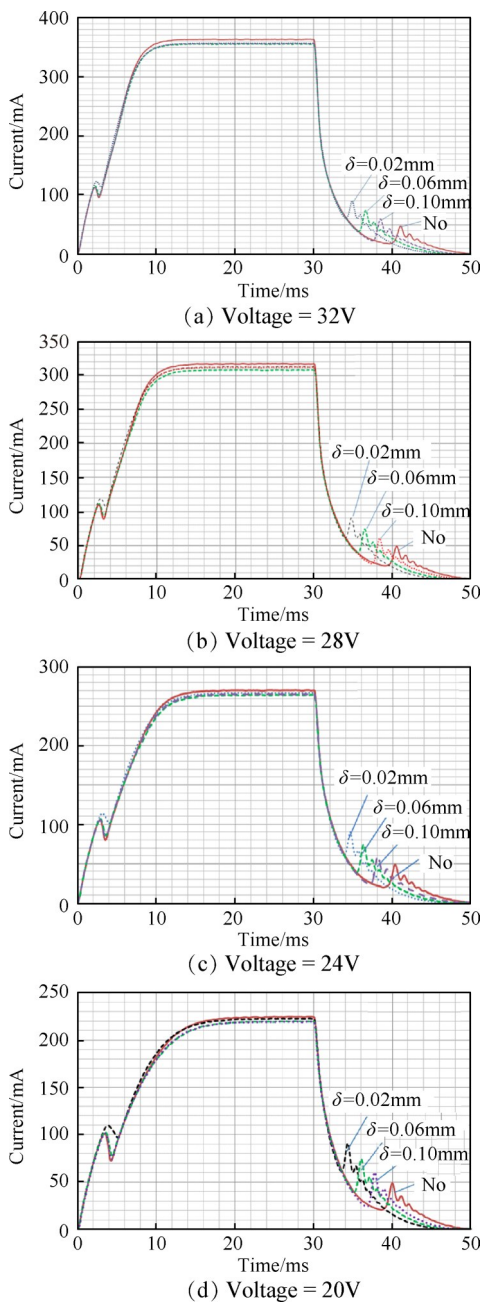


Fig. 9 Current curve with different offsets and voltages

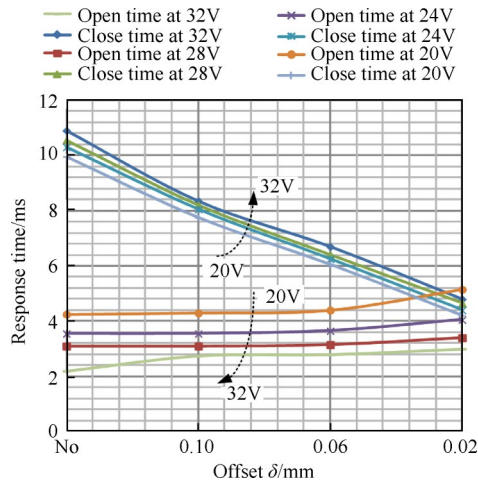


Fig. 10 Response time trend at different voltages and offsets

Table 3 Response time at different voltages and offsets

Voltage/V	δ/mm	t_1/ms	t_2/ms
32	No return spring	2.20	10.90
	0.10	2.75	8.35
	0.06	2.80	6.70
	0.02	3.00	4.80
28	No return spring	3.10	10.55
	0.10	3.10	8.20
	0.06	3.15	6.40
	0.02	3.40	4.65
24	No return spring	3.55	10.30
	0.10	3.55	8.05
	0.06	3.65	6.25
	0.02	4.05	4.40
20	No return spring	4.25	9.95
	0.10	4.30	7.75
	0.06	4.40	6.05
	0.02	5.15	4.20

Table 4 Experimental data during the life test

Switch number	t_1/ms	t_2/ms	$f/(\text{Pa} \cdot \text{L/s})$
2.0×10^5	4.82	3.40	4×10^{-4}
4.0×10^5	4.80	3.39	1×10^{-4}
6.0×10^5	4.81	3.40	2×10^{-4}
8.0×10^5	4.78	3.40	4×10^{-4}
1.0×10^6	4.85	3.40	2×10^{-4}

5 结 论

本文针对螺线管电磁阀开启时间和关闭时间此消彼长的矛盾问题,创新性地提出了基于能量回收原理的高速电磁阀,对其进行了仿真和试验研究,得到以下结论:

(1)高刚度回复弹簧及其间隙 δ 的存在可将高速电磁阀的关闭时间缩短6ms左右,而开启时间仅延长0.3ms(28V驱动电压),开关时间均控制在5ms以内,说明本文提出的高速电磁阀在提高关闭响应速度的同时,并未对开启响应速度产生明显的负面影响。

(2)随着驱动电压由20V升高到32V,此高速电磁阀(δ 取0.02mm)开启时间缩短了2.15ms,而关闭时间仅延长了0.6ms,说明本文提出的高速电磁阀在很大程度上能消除剩磁对关闭时间的影响,解决了传统电磁阀无法通过改变电压同步提高开关响应的问题。

(3)高刚度回复弹簧及其间隙 δ 的独特设计,实现了密封力与回复力的解耦,在实现强回复力的同时,保持了适中的密封力,保证了产品的长寿命和高

可靠性,试验结果表明其具备 100 万次以上的开关寿命。

致 谢:感谢国家自然科学基金资助。

参考文献

- [1] Kagawa H, Kushiki K, Kajiura K. Feasibility Testing for High Temperatures on SV14 Cold Gas Jet Thruster [R]. *AIAA* 2007-5330.
- [2] Kajima T, Kawamura Y. Development of a High-Speed Solenoid Valve: Investigation of Solenoids [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1995, 42(1): 1-8.
- [3] Yang Qing, Zhang Hongguang, Huang Guansheng, et al. A Study on the Fast Response Solenoid Valve in the Electronic Control of Diesel Engine[C]. *Seoul: 2000 FISITA World Automotive Congress*, 2000.
- [4] Tao G, Chen H Y, J Y Y, et al. Optimal Design of the Magnetic Field of a High-Speed Response Solenoid Valve [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129: 555-558.
- [5] Passarini L C, Nakajima P R. Development of a High-Speed Solenoid Valve: an Investigation of the Importance of the Armature Mass on the Dynamic Response [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2003, 25(4): 329-335.
- [6] Wang Qilei, Yang Fengyu, Yang Qian, et al. Experimental Analysis of New High-Speed Powerful Digital Solenoid Valves[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(5): 2309-2313.
- [7] Wang Lan, Li Guo-Xiu, Xu Chun-Long, et al. Effect of Characteristic Parameters on the Magnetic Properties of Solenoid Valve for High-Pressure Common Rail Diesel Engine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 127(1): 656-666.
- [8] Kajima T, Nakamura Y, Sonoda K. Development of a High-Speed Solenoid Valve: Investigation of the Energizing Circuits [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, 40(4): 428-435.
- [9] 宋 进. PWM 驱动模式下螺管电磁阀动特性的优化方法分析[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2002, 8(2): 137-140.
- [10] III-Yeong Lee . Switching Response Improvement of a High Speed On/Off Solenoid Valve by Using a 3 Power Source Type Valve Driving Circuit [C]. *Mumbai: IEEE International Conference on Industrial*, 2006.
- [11] 卜建国,周 明,温浩彦,等. 柴油机高速电磁阀驱动电路响应特性研究[J]. *内燃机工程*, 2017, 38(1): 2-6.
- [12] 官长斌,陈 君,汪旭东,等. 一种基于非耦合永磁偏置的单稳态轴流式电磁阀[P]. *中国专利*: 201510527807.5, 2016-06-01.
- [13] 张 榛,汪旭东,汪凤山. 基于永磁体偏置磁场的高速响应电磁阀设计[J]. *空间推进技术与应用*, 2013, 39(4): 59-62.
- [14] Kong Xiaowu, Li Shizhen. Dynamic Performance of High Speed Solenoid Valve with Parallel Coils [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(4): 816-821.
- [15] 江 澎,雷晓峰,李彦卿. 一种提高电磁阀响应时间的改进设计[J]. *电气开关*, 2015, 53(2): 42-44.
- [16] Nagata T, Kushiki K, Kajiura K. The Development of a Japanese 20N Thruster Valve for a Spacecraft Propulsion System [C]. *Sacramento: 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2006.
- [17] Guan C B, Chen J, Jiao Z X. Dynamic Characteristic Analysis of Monostable Torque Motor Valve of Bipropellant Thrusters [C]. *Harbin: International Conference on Fluid Power & Mechatronics*, 2015.

(编辑:梅 瑛)