

# 集成控制双绕组高速电磁阀的 设计与仿真分析

宋会玲, 王春民, 王云岩, 孙亮, 石芳

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 给直动式电磁阀增加加速启动线圈, 辅以集成控制电路, 研制出一种具有较高附加值的集成控制双绕组高速电磁阀。试验表明: 电磁阀最快开启时间为 2.8 ms, 关闭时间小于 2 ms, 具备明显的响应与结构优势。动态响应仿真分析表明: 在加速线圈的作用下, 电磁阀启动电流迅速上升至磁场饱和; 进入维持打开模式后, 磁场仍趋于饱和, 维持电流高于释放电流, 电磁阀仍有降耗的空间。

**关键词:** 双绕组电磁阀; 集成控制; 仿真; 试验

**中图分类号:** V432-34   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-9374 (2012) 06-0016-04

## Design and simulation analysis of bi-coil high-speed solenoid valve with integrated control

SONG Hui-ling, WANG Chun-min, WANG Yun-yan, SUN Liang, SHI Fang

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

**Abstract:** An integrative bi-coil high-speed solenoid valve with high technique additive was developed by adding an accelerating start coil and controlling control circuit to the direct-acting solenoid valve. Experimental study shows that the fastest response time is 2.8 ms for opening and 2 ms for closing. Dispensing with exterior controlling circuit, the solenoid valve presents distinct superiority in response and structure. Numerical simulation shows the accelerating coil makes the starting current to rise promptly and the magnetic field saturate. When the status of the valve is in maintaining mode, magnetic field in solenoid is still keeping saturated, which indicates the maintaining current is much higher than release current and the energy consumption of valve can be reduced further more.

**Keywords:** bi-coil solenoid valve; integrated control; simulation; experiment

收稿日期: 2012-07-24; 修回日期: 2012-10-29

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2007JY05)

作者简介: 宋会玲(1979—), 女, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计

## 0 引言

姿态控制发动机一般为挤压式液体火箭发动机, 主要由增压系统、推进剂供应系统和多个推力器组成, 其作用为调整卫星入轨姿态。直动式电磁阀由于其结构简单、功能可靠且性能稳定, 在小量级推力器上广泛采用。实际发射过程中, 各推力器工作前, 姿控发动机推进剂供应系统处于已增压、填充状态; 接收指令后, 控制阀的响应速度直接决定了姿态调整的机动性和灵活性, 关系到卫星能否快速、精确入轨。因此控制阀的响应特性, 已经成为航天电磁阀设计中追求的关键性能, 也是高性能电磁阀发展的主要方向。

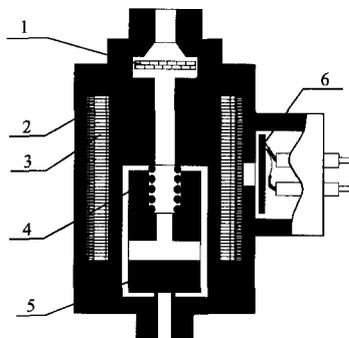
在航空、石化和汽车等应用领域, 高速电磁阀技术得到了长足的发展, 基于各种控制电路的高速电磁阀产品<sup>[1-2]</sup>应运而生。其中最主要的技术是采用升压电路提高启动电流<sup>[3-4]</sup>, 这对于电磁阀控制系统提出较高要求, 因此有必要寻求一种控制简单、使用便捷的快响应电磁阀设计思路。本文介绍的集成控制双绕组电磁阀, 以直动式电磁阀为结构基础, 增加加速启动线圈, 辅以内置芯片式集成电路, 通过对两个线圈工作时序的控制, 实现高电流启动, 低电流维持的工作模式。

## 1 结构和工作原理

电磁阀基本结构如图 1 所示, 主要由阀体、两个线圈、弹簧、外壳、阀芯 (衔铁) 及控制芯片等组成, 采用直流螺管式结构, 耐蚀软磁合金材料, 工作介质可以为四氧化二氮、肼类、氮气及氦气等多种推进剂或气体。

工作原理是: 启动过程中, 两个线圈同时通电, 在高电流作用下, 电磁力迅速增大使衔铁吸合, 阀门打开, 介质通过电磁阀流向下游; 通电 10 ms 后, 加速线圈自动断电, 电磁阀主线圈单独工作维持打开; 断电后, 电磁力消失, 弹簧使衔铁复位, 回到关闭位置, 阻断介质供给。两线圈的工作时序由加速集成电路完成。集成电路采用 PN 结隔离双极结构工艺方法解决元件之间的

隔离和互连问题, 集成为控制芯片安装于电磁阀插座内, 其电路示意图见图 2。I, II, III 三部分作用分别为加速开启、时序控制和加速关闭。



1-过滤器; 2-主线圈; 3-加速线圈; 4-弹簧;  
5-阀芯; 6-控制芯片

图 1 电磁阀结构图

Fig. 1 Structure of high-speed solenoid valve

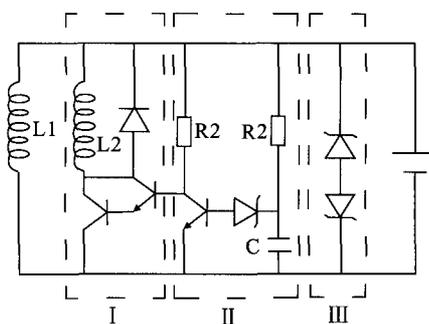


图 2 控制芯片电路示意图

Fig. 2 Diagram of control circuit

## 2 仿真计算

### 2.1 数学模型

电磁阀的数学模型包括: 电路、磁路和运动方程三部分<sup>[5]</sup>。启动时两个线圈并联工作, 对于每个线圈内的电流变化均满足式 (1) 和式 (2):

$$I_i R_i + L_i(t) \frac{dI_i}{dt} = U(t) \quad (1)$$

$$L_i(t) \frac{dI_i}{dt} = N_i \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

式中:  $U(t)$  为  $t$  时刻电磁阀两端电压, V;  $I_i$  为  $i$  线圈的电流, A;  $R_i$  为  $i$  线圈的电阻,  $\Omega$ ;  $L_i$  为  $i$  线

圈的电感, H;  $N_i$  为  $i$  线圈的匝数, 匝;  $\Phi$  为磁路的磁通量, Wb。

电磁阀中磁势变化过程, 由方程(3)~(7)表示:

$$N_i I_i = \Phi R_m \quad (3)$$

$$R_m = R_{mf} + R_\delta + R_f \quad (4)$$

$$R_\delta = \frac{(\delta_0 - x)}{\mu_0 A} \quad (5)$$

$$R_{mf} = \frac{l_m}{\mu S} \quad (6)$$

$$F_{ec} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A} \quad (7)$$

式中:  $R_m$  为磁路总磁阻;  $R_{mf}$  为导磁材料的磁阻;  $R_\delta$  为工作气隙磁阻;  $R_f$  为非工作气隙的磁阻;  $\delta_0$  为最大工作气隙, m;  $x$  为衔铁的位移, m;  $\mu_0$  为空气磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m;  $l_m$  为铁磁材料有效长度, m;  $\mu$  为磁材料磁导率, H/m;  $S$  为磁路截面积,  $m^2$ ;  $F_{ec}$  为电磁吸力, N。

阀芯运动由式 (8) 表示<sup>[6]</sup>:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{m} \left[ F_{ec} - F_f - c \frac{dx}{dt} - k(x + x_p) \right] \quad (8)$$

式中:  $m$  为阀芯质量, kg;  $c$  为阀芯运动时的等效阻尼系数, Ns/m;  $k$  为弹簧刚度, N/m;  $x_p$  为弹簧预紧量, m;  $F_f$  为阀芯所受介质力, N, 空载时  $F_f = 0$ 。

### 2.2 结果分析

电磁阀工作时间为 24 ms, 0 时刻开始给电磁阀接通 28 V 直流电压, 20 ms 时电磁阀断电。按照自身工作时序, 前 10 ms 双线圈同时通电, 10 ms 时加速线圈断电, 10~20 ms 只有维持线圈工作, 20 ms 时维持线圈断电。衔铁位移随电流变化趋势如图 3 所示, 通电后 2.2 ms 衔铁开始运动, 3.3 ms 衔铁完全吸合, 与实测的电磁阀打开时间为 3.5 ms 基本吻合; 由于稳压二极管的作用, 断电后回路电流迅速减至 0, 衔铁回落时间约为 1 ms。电磁阀的启动过程 (前 10 ms) 电流变化较复杂, 如图 4 所示, 由于 B 线圈 (加速线圈) 的电流上升较快, 初始时刻在 A、B 线圈组成的回路中, 出现由 B 向 A 的电流, 表现为 A

线圈电流短暂呈现负值, 但总电流仍以较快速度上升, 表明加速线圈对提高启动电流作用明显。

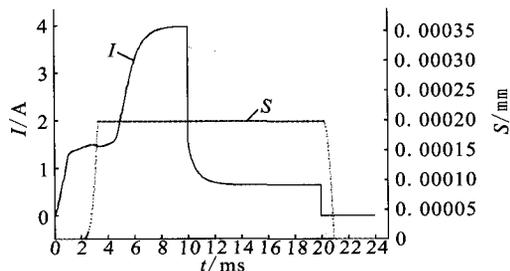


图 3 位移与电流变化情况

Fig. 3 Displacement with current variation

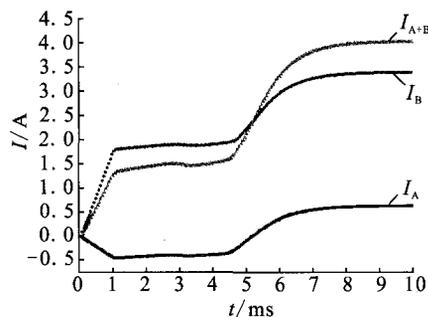
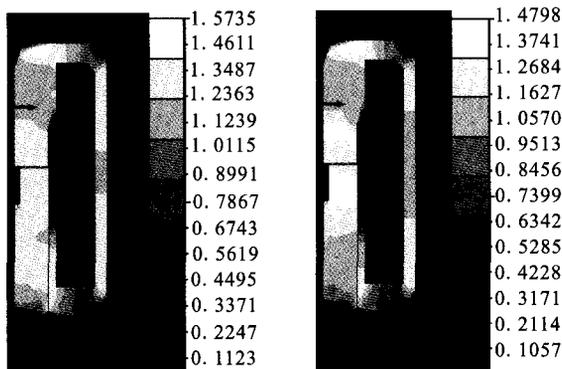


图 4 线圈与回路中的电流变化

Fig. 4 Current curves in coil and return circuit

磁感应强度分布云图如图 5 所示。



(a)  $t=9.95$  ms 时磁感应强度分布 (b)  $t=18$  ms 时磁感应强度分布

图 5 磁感应强度分布云图

Fig. 5 Contours of magnetic induction intensity

图 5 (a) 中  $t=9.95$  ms 时刻为电流最大时刻, 最高磁感应强度出现在工作气隙两端的阀芯、挡铁以及电磁铁上肩部, 且已经达到材料的饱和磁

感应强度, 磁场已经饱和, 表明启动过程中电流已达到最高有效值, 磁路结构限制了电磁阀的工作能力。图 5(b)中  $t=18\text{ ms}$  时, 电磁阀以维持电流工作, 此时磁感应强度仍趋于饱和, 计算表明, 电磁阀的维持电流还有较大的下调空间。

### 3 试验情况

对安装了集成控制芯片的电磁阀进行响应时间测试, 得到启动时间随载荷和控制电压的变化情况, 如图 6 所示。载荷越小、控制电压越高, 电磁阀的启动越快, 电磁阀开启时间在 2.8~8.8 ms 之间; 为保证电磁阀的启动速度, 电磁阀的推荐工作电压为 28~36 V, 适应载荷在 4 MPa 以下; 当载荷大于 4 MPa 后, 有必要提高控制电压, 当电压达到 36 V 以上, 电磁阀的打开时间可以达到 6 ms 以下。通过观察电流曲线, 发现电磁阀的电流释放时间均在 1 ms 以内。

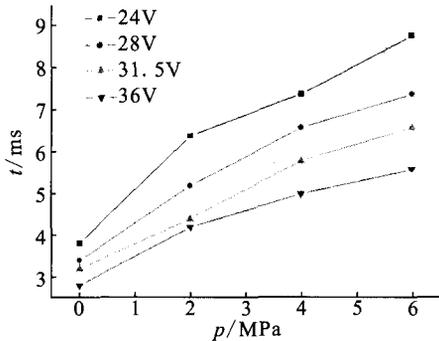


图 6 打开时间随控制电压变化趋势

Fig. 6 Variation of response time with control voltage

场饱和的现象, 现有的磁路结构限制了电磁阀的作功能力, 有必要对电磁结构参数进行进一步的优化设计。

3) 电磁阀自身的控制电路芯片完成了对电磁阀线圈的通断电时序控制, 以及对电磁线圈的快速放电, 时序正确且性能稳定。

根据上述结果分析可得, 双绕组工作模式可以在一定程度上提高电磁阀的响应性能, 并解决高功率启动, 低功率维持问题, 但线圈互感的增加也限制了启动电流上升速度的进一步提高; 另一方面, 将控制电路集成在芯片上并内置于电磁阀中, 使电磁阀产品自身具有独立的加速功能, 而无需依附外加控制电路的设计思路是可行的。

### 参考文献:

- [1] 白思春, 褚全红, 孟长江, 等. 燃油系统高速电磁阀驱动技术的研究[J]. 车辆与动力技术, 2007 (4): 27-31.
- [2] 杜荣发, 黄娟. 电喷系统高速电磁阀的仿真及响应分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(5): 1080-1083.
- [3] 宋国民, 李俊, 胡林峰, 等. 一种新型高压共轨喷油器高速电磁阀驱动模块研究与开发[J]. 内燃机工程, 2005, 26(6): 1-4.
- [4] 宋军, 李书泽, 李孝禄, 等. 高速电磁阀驱动电路设计及试验分析[J]. 汽车工程, 2005, 27(5): 546-549.
- [5] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [6] 潘小旺, 林敏, 郭斌, 等. 气动电磁阀动态特性仿真与试验研究[J]. 中国计量学院学报, 2010, 21(3): 232-236.
- [7] 巴文厂, 杜运峰, 姜虎强. 基于 CAN 总线的电磁阀控制系统实现[J]. 科技信息, 2007 (9): 81-82.
- [8] 耿守本, 韩国华. 一种高速开关电磁阀智能驱动模块的设计[J]. 工业控制计算机. 2011, 24(2): 89-91.
- [9] 杨玉涛, 张小栋. 高速电磁阀模型建立及响应特性研究[J]. 测控技术, 2008, 27(6): 86-89.
- [10] 张敏敏, 陈俐, 霍易, 等. 高速电磁开关阀非线性模型简化与验证[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(7): 1005-1009.
- [11] 阮晓芳, 孔晓武, 尹学松. 高速开关阀驱动电路的仿真与试验[J]. 研究机电工程, 2011, 28(2): 209-211.

### 4 结论

仿真分析及试验表明:

1) 启动时, 由于两个线圈同时通电, 相互作用导致各线圈的电感和电流变化相对复杂, 但叠加后的总电流快速单调上升至触动电流后达到拐点, 加速线圈起到了提高起电电流的作用。

2) 电磁阀启动和维持过程中, 均出现了磁

(编辑: 张永秀)