

# 基于 AMESim 的直动式电磁阀动态仿真研究

袁洪滨<sup>1</sup>, 张民庆<sup>2</sup>, 孙彦堂<sup>1</sup>

(1. 西安航天动力研究所, 西安 710100; 2. 上海空间推进研究所, 上海 200233)

**摘 要:** 介绍了直动式电磁阀的结构和工作原理, 利用 AMESim 仿真软件, 建立了基于 AMESim 的直动式电磁阀动态仿真模型, 并进行了仿真, 研究了软磁材料、励磁电压、等参数对直动式电磁阀动态响应的影响。仿真分析与试验验证比较表明, 该 AMESim 模型较为准确地描述了电磁阀的动态特性。

**关键词:** 电磁阀; 响应特性; AMESim

**中图分类号:** V430-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 05-0030-07

## AMESim-based simulation analysis of dynamic characteristics of direct-acting solenoid valve

YUAN Hong-bin<sup>1</sup>, ZHANG Min-qing<sup>2</sup>, SUN Yan-tang<sup>1</sup>

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The mechanical structure and working principle of a direct-acting solenoid valve are introduced. The AMESim-based simulation model of the direct-acting solenoid valve is built. The influences of soft magnetic material, exciting voltage, number of windings circle on the dynamic response characteristics of the solenoid valve are analyzed. The comparison between the test data and simulation analytic results indicates the validity of the AMESim model.

**Keywords:** solenoid valve; response characteristic; AMESim

## 0 引言

液体火箭发动机的流体控制系统中大量使用电磁阀作为开关执行元件, 控制流体的开启和断流, 实现发动机多次重复启动和脉冲工作, 对发动机的开、关动态特性及脉冲特性有着重要的影

响。直动式电磁阀以其结构简单、成本低、响应快、可靠性高等特点在航天、航空、石化等领域得到广泛应用。

国外通过采用新材料、新技术和优化结构设计等手段, 不断改进和提高直动式电磁阀的响应性能, 美国小型反推力控制系统上使用的 SSPCT-VT 推进剂直动螺管式电磁阀打开时间和

收稿日期: 2011-06-02; 修回日期: 2011-07-19

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目

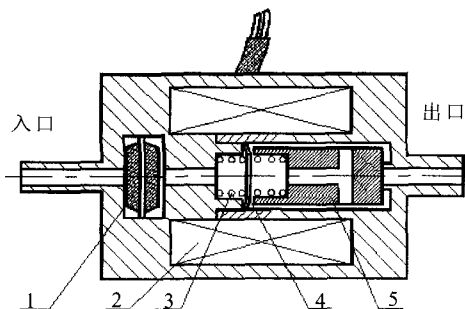
作者简介: 袁洪滨 (1970—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门

关闭时间分别为 12 ms 和 7 ms。美国 R-6C 推力装置上电磁阀打开和关闭时间均不大于 5 ms。Moog 公司电磁阀工作压力 3 MPa, 推力为 445 N, 响应时间不大于 20 ms。日本为宇宙飞船推进系统研制的 20 N 推力室阀, 打开时间和关闭时间分别为 10 ms 和 2 ms。

随着科学技术、仿真实论及计算机技术的发展, 仿真技术不断提高, 并促进了科学研究水平的提高、缩短了研究周期、降低了科学研究成本及风险、促进了各个不同领域的融合。AMESim (Advanced Modeling Environment for Performing Simulations of Engineering System) 作为一种优秀的仿真软件, 为流体、机械、控制、电磁等工程系统提供了一个较为完善的综合仿真环境。它是基于直观的图形化仿真环境, 用于工程系统的建模、仿真和动态分析等。本文以某发动机上的直动式电磁阀为研究对象, 建立了该电磁阀开启与关闭过程的非线性数学模型, 利用 AMESim 工具仿真了动态响应特性, 并分析了线圈励磁电压、线圈匝数、介质压力、反力等因素对响应特性的影响。

## 1 组成及工作原理

直动式电磁阀结构如图 1 所示。主要由阀体、线圈组件、弹簧、外壳、阀芯 (衔铁) 及阀座等组成, 采用传统螺线管式结构, 工作介质一般是四氧化二氮、肼类、氮气、氦气、氙气等。



1- 过滤器; 2- 线圈; 3- 螺旋弹簧;  
4- 片弹簧; 5- 阀芯 (衔铁)

图 1 直动式电磁阀结构

Fig. 1 Structure of direct-acting solenoid valve

其工作原理是: 当线圈通电时线圈产生足够的电磁力克服弹簧和介质压力, 驱动阀芯 (衔铁) 运动, 阀门打开, 工作介质由阀门的入口经过阀芯 (衔铁) 上的流道, 从下游流出; 当线圈断电时, 电磁力消失, 阀芯 (衔铁) 在弹簧力和介质压力作用下复位, 回到关闭位置, 形成密封, 将介质流动截断。为了减小电磁阀的关闭时间, 采用片弹簧和圆柱弹簧共同作用, 提高阀芯的关闭响应速度。

## 2 数学模型

直动式电磁阀的响应时间受电、磁、机三项因素影响, 动态过程遵循电压平衡方程、麦克斯韦方程、达朗贝尔运动方程和热平衡方程。由于电磁阀动态过程历时极短, 电磁系统又存在着热惯性, 故温度变化极微, 引起电阻的变化很小, 可忽略不计, 因此, 数学模型中可不包含热平衡方程。

### 2.1 电路模型

电磁线圈的电路数学模型按公式 (1) 计算

$$\begin{cases} U = iR + \frac{d\psi}{dt} \\ L(x, i) = \frac{\psi}{i} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U$  为线圈电压, V;  $i$  为线圈电流, A;  $R$  为线圈回路总电阻,  $\Omega$ ;  $\psi$  为线圈总磁链, Wb;  $t$  为通电时间, s;  $L$  为线圈电感, H;  $x$  为气隙长度, m;  $v$  为阀芯 (衔铁) 的运动速度, m/s。

### 2.2 磁路模型

根据基尔霍夫磁压定律, 可得出磁路计算模型, 即

$$iN = \Phi_{\delta} (R_{\delta} + R_n + R_m) \quad (2)$$

式中:  $N$  为线圈匝数, 匝;  $\Phi_{\delta}$  为线圈磁通, Wb;  $R_{\delta}$  为工作气隙磁阻, A/Wb;  $R_n$  为非工作气隙磁阻, A/Wb;  $R_m$  为磁性材料磁阻, A/Wb。

$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S_{\delta}} \quad (3)$$

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_m S_m} \quad (4)$$

式中:  $\delta$  为工作气隙长度, m;  $l_m$  为磁性材料长

度,  $m$ ;  $\mu_0$  为真空磁导率,  $H/m$ ;  $\mu_m$  为磁性材料磁导率,  $H/m$ ;  $S_\delta$  为气隙截面积,  $m^2$ ;  $S_m$  为导磁材料截面积,  $m^2$ 。

### 2.3 运动模型

$$m \frac{dv}{dt} = F_x - F_{t1} - F_{t2} - F_{yy} - F_f \quad (5a)$$

$$m \frac{dv}{dt} = F_{t1} + F_{t2} + F_{yy} - F_x - F_f \quad (5b)$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

$$F_{yy} = (p_1 - p_2) S_y \quad (7)$$

$$F_{t1} = K(h_0 + x) \quad (8)$$

$$F_{t2} = \frac{t^3 f}{\alpha D^2} \left[ \left( \frac{h_1}{t} - \frac{f}{t} \right) \left( \frac{h_1}{t} - \frac{f}{2t} \right) + 1 \right] \quad (9)$$

$$F_f = f_1 v \quad (10)$$

式中:  $m$  为阀芯(衔铁)质量,  $kg$ ;  $F_x$  为电磁吸力,  $N$ ;  $F_{t1}$  为圆柱螺旋弹簧安装力,  $N$ ;  $F_{t2}$  为片簧力,  $N$ ;  $F_{yy}$  为液压不平衡力,  $N$ ;  $F_f$  为摩擦力,  $N$ ;  $p_1$  为阀门入口压力,  $MPa$ ;  $p_2$  为阀门出口压力,  $MPa$ ;  $S_y$  为液压不平衡面积,  $m^2$ ;  $K$  为圆柱弹簧刚度,  $N/m$ ;  $h_0$  为圆柱弹簧初始安装变形量,  $m$ ;  $x$  为阀芯行程,  $m$ ;  $f$  为片簧变形量,  $m$ ;  $f_1$  为摩擦系数,  $kg/s$ ;  $t$  为片簧厚度,  $m$ ;  $h_1$  为片簧压并时变形量,  $m$ ;  $D$  为片簧的外径,  $m$ ;  $\alpha$  为片簧系数, 与片簧材料弹性模量、泊松比等有关的系数。

式(5a)为阀芯吸动过程运动件运动方程, (5b)为阀芯释放过程运动件运动方程。

### 2.4 流量方程

$$Q_v = c_q A_v \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (11)$$

式中:  $Q_v$  为介质容积流量,  $m^3/s$ ;  $c_q$  为流量系数;  $A_v$  为阀口截流面积,  $m^2$ , 与阀口开度有关;  $\rho$  为介质密度,  $kg/m^3$ 。

## 3 仿真结果与分析

AMESim 是由法国 IMAGINE 公司开发的、具有仿真和动态性能分析功能的图形化系统建模

软件, 具有丰富的模型库, 利用各个模块的组合, 能方便、准确地建立动态系统的计算机模型。本文研究的直动式电磁阀是电、磁、机、液四者的非线性耦合系统, 在运动过程中, 各系统发生变化并相互影响。采用 AMESim 软件建立阀的仿真模型, 将电磁阀电路模型、磁路模型和机械模型联系起来, 通过调用各个模块的参数, 并利用分析工具, 可以直观清楚的分析出吸力、位移、运动速度、电流等各个动态量的变化信息。

本文对已经成熟使用的某直动式电磁阀建立仿真模型, 如图 2 所示。

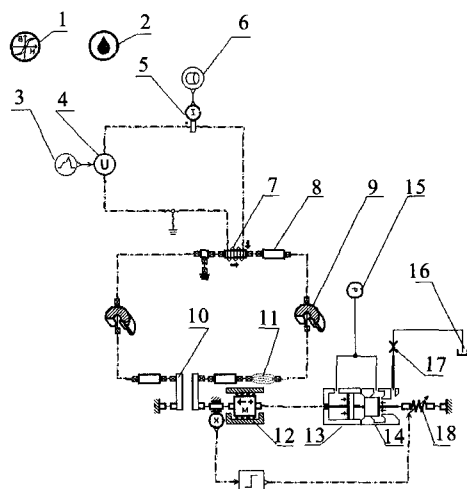


图2 直动式电磁阀的 AMESim 仿真模型

Fig. 2 AMESim simulation model of direct acting solenoid valve

此模型包括 AMESim 中的液压、电磁、机械、信号模型库中的子模型, 根据阀门的具体物理结构、工作原理、研究时关心的现象等选择合理的子模型。各子模型功能如表 1 所示。

当电磁阀入口在 2.3 MPa 介质压力、0.15 s 时给电磁阀输入一阶跃电压信号, 通电作用时间为 0.1 s, 仿真时间为 0.35 s, 电磁阀开启和关闭过程的动态特性仿真曲线如图 3 所示, 同时给出了电流随时间变化的实测曲线。

由图 3 可知, 在输入阶跃电压后, 电流按指数规律增长到吸动电流为止所需的吸合触动时间约 9.1 ms, 这个阶段吸力小于反力, 衔铁尚未运动; 位移、速度均为 0。当吸力大于反力, 衔铁开始运动, 直到衔铁与轭铁接触止动所需的吸合

运动时间为 1.8 ms; 运动过程中, 位移和速度均大于 0, 由于衔铁速度的逐增, 产生运动反电势, 使电流下跌, 直至衔铁终止运动, 电磁阀开启响应时间为 10.9 ms。之后, 电流又按新的指数规律上升, 直到稳态, 稳态电流峰值为 0.54 A。

线圈通电 0.1 s 后断电以后, 电流下降, 跟吸合过程一样, 关闭过程分为关闭触动过程和关闭运动过程。由仿真结果知, 电磁阀关闭触动时间为 35.8 ms, 关闭运动时间为 3.8 ms, 关闭响应时间为 39.6 ms。

表 1 主要子模型功能

Tab. 1 Function of primary submodels

图 2 中序号	子模型功能	所属模型库	设置参数
1	磁性能参数集合	电机库	设置磁性参数
2	液体性能参数集合	液压库	设置液体类型
3	电压控制信号	信号库	设置电压的变化规律
4	电压源	基本电性库	将控制信号转换为电压
5	电流计	基本电性库	设置电流增益的影响
6	数据存储库	信号库	存储系统输出的电流数据
7	线圈	电机库	设置线圈匝数、线阻
8	磁阻	电机库	设置轴向磁路长度、面积、时间常数
9	磁阻	电机库	设置径向磁路长度、面积、时间常数
10	工作气隙	电机库	设置气隙长度、面积、涡流系数
11	漏磁	电机库	设置漏磁系数
12	阀门运动部件质量块	机械库	设置运动件质量、摩擦力、行程
13, 14	阀芯和阀座组合	液压库	设置阀座直径、密封面直径
15	液压源	液压库	设置液体压力
16	贮箱	液压库	液体排放收集容器
17	节流圈	液压库	设置液体出口端节流孔参数
18	变刚度弹簧	气压库	设置弹簧刚度、初始弹簧力、弹簧行程

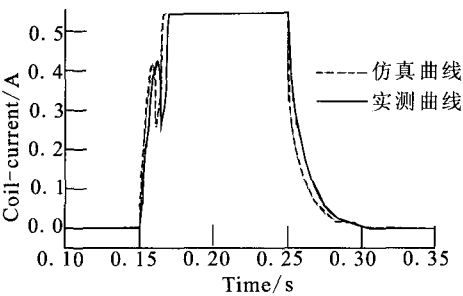


图 3 响应特性曲线

Fig. 3 Curves of response characteristics

经过对电磁阀实测 2.3 MPa 下的电流曲线, 可以知道开启响应时间为 11~12 ms, 关闭响应时间为 36~40 ms, 仿真计算结果与电磁阀的实际响应时间基本一致。

影响电磁阀响应特性的因素有很多, 下面讨

论线圈励磁电压、线圈匝数、电阻、气隙、介质压力、反力因素、软磁合金材料等对电磁阀响应特性的影响, 从而为优化设计此类阀门, 提高其响应特性提供参考。

3.1 线圈励磁电压对电磁阀响应特性的影响

线圈励磁电压影响直动式电磁阀的线圈电流, 进而对线圈磁势产生影响, 由电路模型的公式 (1) 和磁路模型的公式 (2) 可以看出, 线圈电压越高, 线圈磁势越大。

航天型号电磁阀的工作电压一般为 28±3 V, 按该励磁电压对模型进行动态仿真, 得到的仿真电流曲线见图 4, 从图 4 中可以看出: 输入电压越高, 电磁阀开启阶段线圈中的电流上升越快, 衔铁在电磁吸力作用下迅速启动, 阀开启时间就越短; 由于软磁材料的剩磁特性, 切断电压后会

剩下较大的磁性,电压越高,剩磁越大,克服剩磁力所需的时间越长,因此造成电磁阀关闭时间更长。

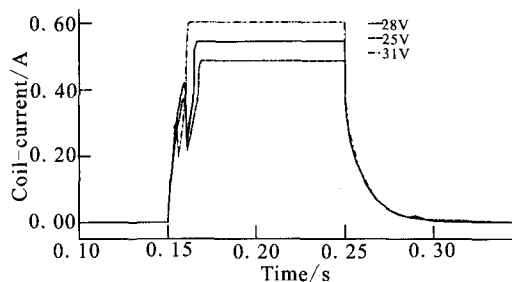


图4 线圈励磁电压对响应特性的影响

Fig. 4 Influence of exciting voltage on response characteristics

### 3.2 线圈匝数对电磁阀响应特性的影响

线圈匝数的增加能提高磁势,促进电能与磁能的转换,从而增强电磁力,加快响应速度,但是也相应增加了线圈的感应系数,增大了电流的响应时间常数。从图5中可以看出电磁阀打开时间和关闭时间随着匝数的增加而增加,但匝数太小,产生的电动势无法满足电磁阀打开所需的电磁吸力,则电磁阀无法开启,因此需要优化线圈匝数,既可以使电磁阀开启的响应时间和关闭时间最短,又满足电磁阀可靠工作所必需的电磁力。

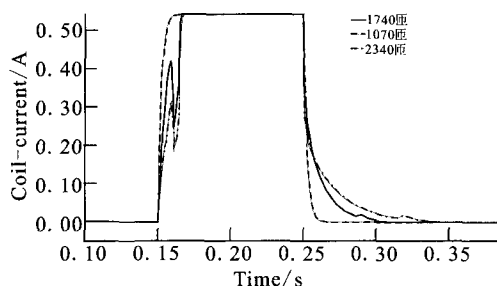


图5 线圈匝数对响应特性的影响

Fig. 5 Influence of number of windings on response characteristics

### 3.3 工作气隙对电磁阀响应特性的影响

工作气隙对电磁阀响应特性的影响由图6可以看出:当工作气隙增大时,气隙磁阻加大,初始电磁力减小,电磁力上升缓慢,所以阀的开

启时间加大。关闭过程中,由于阀的运动距离加长,运动时间就有所加长,因此,工作气隙越大,衔铁行程越长,电磁阀开启时间就越长。当工作气隙大到一定的程度,电磁阀将因为磁势不足而无法开启电磁阀。工作气隙的大小不仅决定了电磁阀工作能力与适用范围,对电磁阀的性能影响很大。

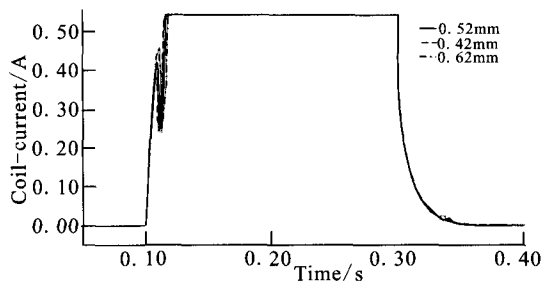


图6 气隙对电磁阀响应特性的影响

Fig. 6 Influence of air gap on response characteristics of solenoid valve

### 3.4 介质压力对电磁阀响应特性的影响

由图7可以看出:随着推进剂压力的增加,阀芯开启时需要克服的液压不平衡力加大,则电磁力需要经过较长一段触动时间的增长才能使衔铁运动,所以电磁阀开启时间加长。电磁阀关闭时,在出口节流圈相同情况下,介质压力越大,阀芯两端压差越大而使液压不平衡力越大,并有利于阀芯的关闭,电磁阀的关闭响应时间越小。

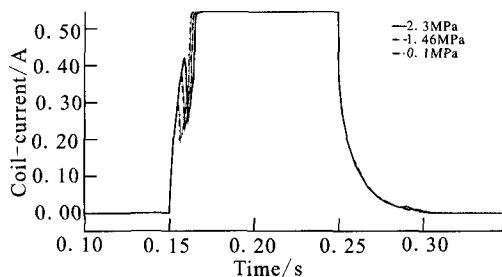


图7 介质压力对电磁阀响应特性的影响

Fig. 7 Influence of medium pressure on response characteristics of solenoid valve

### 3.5 软磁合金材料性能的影响

目前国内外直动式电磁阀常用的软磁合金材料主要有四种,即铁铝合金材料、电磁纯铁、坡

莫合金以及铁钴合金等, 其中电磁纯铁的磁性能最优。

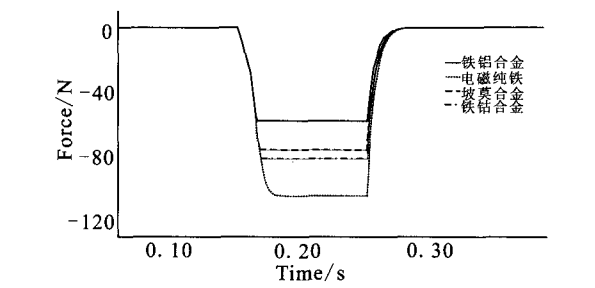


图 8 材料对电磁吸力的影响  
Fig. 8 Influence of different materials on valve suction force

由图 8 可以看出: 采用电磁纯铁材料作为导磁材料的产生的电磁吸力最大, 以后依次是铁钴合金、坡莫合金、铁铝合金。说明具有高饱和磁通密度和高电阻率的材料能将更多的电能转化为磁能。

3.6 弹簧力对电磁阀响应特性的影响

弹簧力对电磁阀响应特性的影响见图 9。

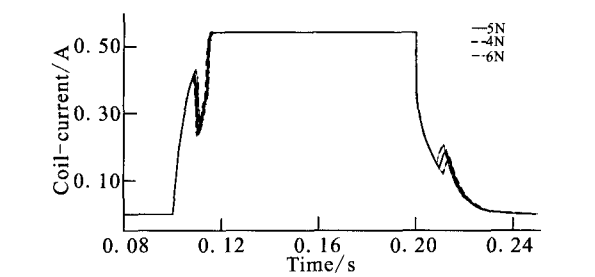


图 9 不同弹簧安装力对电流特性的影响  
Fig. 9 Influence of different spring forces on current characteristics

由图 9 可知: 弹簧力越大, 阀开启时克服的

反力越大则开启响应越慢; 关闭时, 弹簧力有利于衔铁的快速释放, 因此, 弹簧力越大, 关闭时间越小。要合理确定弹簧安装力的大小, 必须兼顾阀的开启和关闭时间。

4 结论

本文基于某型直动式电磁阀的实际试验结果, 利用 AMESim 软件建立了仿真模型, 实现了电磁回路、机械部件和液压系统之间的耦合, 结果与电磁阀测试结果一致, 同时对影响电磁阀性能的各种因素进行了仿真分析, 为深入分析和掌握直动式电磁阀的特性提供有益的帮助, 对于把握电磁阀整体性能具有较高的参考价值。

参考文献:

[1] 沈赤兵. 电动气阀动态特性及反力因素的影响[J]. 推进技术, 1996, 17(6): 64-68.  
[2] 李庆. AMESim 系统建模和仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.  
[3] 沈公槐. 改进电磁阀动态特性的一种方法[J]. 航天控制, 2001 (3): 75-81.  
[4] 王扬彬, 徐兵. 基于 Ansoft 及 AMESim 的电磁铁动态特性仿真分析 [J]. 机床与液压, 2008,36(9): 104-108.  
[5] 王宝龄. 电磁电器设计基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.  
[6] NAGATA T, KUSHIKI K, KAJIWARA K. The development of Japennese 20N thruster valve for a spacecraft propulsion system-qualification test result, IAC-08- C4.3.4 [R]. Japan: IAC, 2008.

(编辑: 马 杰)