

电磁阀动态响应特性仿真研究

戴 佳, 黄敏超, 余 勇, 朱恒伟, 马加庆
(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 建立了电磁阀动态过程数学模型, 包括电动气阀数学模型和气动液阀数学模型, 运用 Matlab/Simulink 将两个模型联系起来求解, 实现了诸如电流、电磁力、衔铁和活塞位移、速度以及控制腔压力、体积等参数变化的动态过程仿真, 并运用此模型研究了线圈励磁电压、线圈匝数、电阻、气隙、气源压力、反力因素以及结构尺寸参数等对电磁阀响应特性的影响。

关键词: 电磁阀; 数学模型; 仿真; 响应特性

中图分类号: V432

文献标识码: A

文章编号: (2007) 01-0040-09

Simulation on the dynamic response characteristics of solenoid valve

Dai Jia, Huang Minchao, Yu Yong, Zhu Hengwei, Ma Jiaqing
(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In this article, the mathematical model of a solenoid valve including the electro pneumatic valve model and the pneumatic hydraulic valve model is presented. These two models are related by using Matlab Simulink to form the software simulation model. So that the current, the magnetic force, the displacement, the velocity, the pressure and the volume of the control cavity can be simulated. The influences of such factors as the voltage, the number of winding circle, the resistance, the width of solenoid air gap, the pressure of the compressed gas, the reaction factors and the size parameters, etc. on the response characteristics of the solenoid valve are analyzed.

Key words: solenoid valve; mathematical model; simulation; response characteristics

收稿日期: 2006-04-18; 修回日期: 2006-06-12。

作者简介: 戴佳 (1983—), 女, 硕士, 研究领域为空间推进系统动态特性分析。

符号说明:

U	——	电压, V	i	——	电流, A
R_w	——	线圈电阻, Ω	Ψ	——	磁链, Wb
N_w	——	线圈匝数, 匝	t	——	时间, s
Φ_m	——	磁路中的磁通量, Wb	Φ_δ	——	气隙中的磁通量, Wb
R_δ	——	工作气隙磁阻	H_m	——	磁场强度, A/m
R_n	——	非工作气隙磁阻	R_m	——	对应磁路磁阻
L_m	——	磁路长度, m	B_m	——	磁路中的磁感应强度, T
S	——	气隙处的磁极面积, m^2	μ_0	——	真空磁导率, H/m
g_{max}	——	最大气隙长度, m	g_{min}	——	最小气隙长度, m
δ	——	气隙长度, m	x	——	位移, m
σ	——	漏磁系数	v	——	速度, m/s
F_x	——	电磁吸力, N	F_p	——	压强力, N
F_s	——	弹簧力, N	F_f	——	摩擦力, N
p	——	压强, Pa	A	——	面积, m^2
d	——	直径, m	r	——	半径, m
T	——	温度, K	C	——	弹簧刚度, N/m
f	——	摩擦系数, kg/s	R	——	气体常数, J/kg·K
μ	——	流量系数	γ	——	气体比热比
F_{s0}	——	弹簧预紧力, N	F_0	——	静摩擦力, N
V	——	控制腔气体体积, m^3	\dot{m}	——	气体质量流量, kg/s

下标:

1	——	电动气阀	2	——	气动液阀
0	——	外界环境	N	——	高压气体
lin	——	电动气阀控制腔入口	2in	——	气动液阀控制腔入口
out	——	排气口	mid	——	活塞中轴杆截面
2o	——	气动液阀氧化剂入口	2f	——	气动液阀燃料入口

1 引言

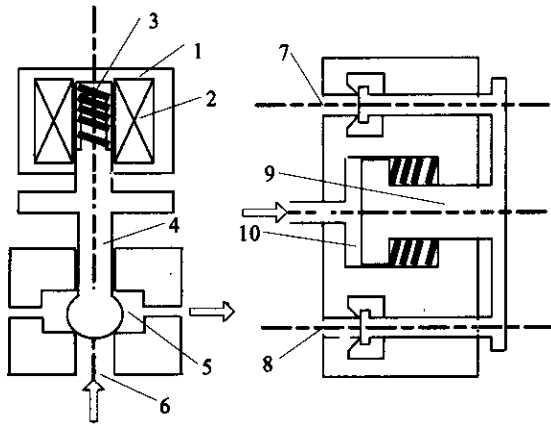
电动气阀和气动液阀经常结合使用, 可多次工作, 被广泛应用于液体火箭发动机的推进剂供应系统之中, 直接控制着发动机的工作和关机, 对发动机的开、关动态特性及脉冲动态特性有着重要的影响。本文以某轨控发动机上使用的电磁阀为研究对象, 建立了此阀开启与关闭过程的非线性数学模型, 利用 MATLAB 中的 SIMULINK 工具仿真了相应的动态响应特性, 并分析了线圈

励磁电压、线圈匝数、电阻、气隙、气源压力、反力因素以及尺寸参数等对电磁阀响应特性的影响。本文得出的一些结论可简化电磁阀的参数选择、修正及优化设计过程。

2 电磁阀的组成及其工作原理

电磁阀的结构如图 1 所示, 它由电动气阀和气动液阀两部分组成, 电动气阀与高压气源相连, 气动液阀的推进剂入口和推进剂供应管路相连, 出口紧挨喷注器入口。

电动气阀线圈通电后,在电磁吸力的作用下逐渐打开,高压气体进入电动气阀控制腔使其控制腔气体压力急剧上升,同时,气动液阀控制腔气体压力上升,气动液阀活塞逐渐打开,完成电磁阀的开启过程。当发出关机指令时,电动气阀线圈断电,当吸力已不足吸住衔铁,衔铁即开始释放,直至电动气阀阀口关闭,与此同时,电动气阀控制腔气体通过排气口流出,控制腔泄压,气动液阀控制腔随之泄压,气动液阀活塞在弹簧力的作用下逐渐关闭,完成电磁阀关闭过程。



电动气阀示意图

气动液阀示意图

- 1-电磁导体; 2-线圈; 3-弹簧; 4-衔铁组件;
5-电动气阀控制腔; 6-高压气源; 7-氧化剂入口;
8-燃料入口; 9-活塞作动杆; 10-气动液阀控制腔

图 1 电磁阀示意图

Fig.1 The structure of the solenoid valve

3 电磁阀动态数学模型

3.1 电动气阀动态数学模型

电动气阀的动态过程在电路上遵循电压平衡方程,在磁场上遵循麦克斯韦方程,在运动上遵循达朗贝尔运动方程,在热路上遵循热平衡方程。这些方程间存在相互联系,构成了描述整个电磁机构动态过程的数学模型。由于电动气阀的动态过程历时极短,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^[1]。

3.1.1 电路数学模型

$$U = iR_w + \frac{d\Psi}{dt} = iR_w + \frac{d(N_w \Phi_m)}{dt} = iR_w + N_w \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1)$$

3.1.2 磁路数学模型

根据基尔霍夫磁压定律,可得出磁路计算的数学模型,即

$$iN_w = \Phi_\delta (R_\delta + R_n + R_m) \quad (2)$$

忽略衔铁及非工作气隙磁阻, (2) 式变为

$$iN_w = \Phi_\delta R_\delta + H_m L_m \quad (3)$$

气隙磁阻为

$$R_\delta = \delta / (\mu_0 S) = (g_{\max} - x_1) / (\mu_0 S) \quad (4)$$

$$B_m = \Phi_m / S \quad (5)$$

材料磁化曲线数据利用 MATLAB/SIMULINK 中的一维线性内插模块 (Look-Up Table) 进行数据分段插值,查找 B_m 所对应的 H_m 。

考虑漏磁时,漏磁系数为

$$\sigma = \Phi_m / \Phi_\delta \quad (6)$$

漏磁系数由电磁阀结构尺寸参数求得^[2]。

根据麦克斯韦电磁吸力公式,电磁阀气隙的吸力公式为

$$F_x = \Phi_\delta^2 / (2\mu_0 S) \quad (7)$$

3.1.3 运动数学模型

$$m_{t1} \frac{dv_1}{dt} = F_x + F_{p1} - F_{f1} - F_{s1} \quad (8a)$$

$$m_{t1} \frac{dv_1}{dt} = F_x + F_{p1} + F_{f1} - F_{s1} \quad (8b)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = v_1 \quad (9)$$

$$F_{p1} = (p_1 - p_0) A_{mid1} \quad (10)$$

$$F_{s1} = F_{s01} + C_1 x_1 \quad (11)$$

$$F_{f1} = f_1 v_1 \quad (12)$$

其中,式 (8a) 为衔铁吸动过程运动件运动方程, (8b) 为衔铁释放过程运动件运动方程。

3.1.4 控制腔气体动态数学模型

视控制腔气体为理想气体,忽略气体的动能变化,由能量方程和理想气体状态方程得

$$m_1 \frac{dT_1}{dt} = \dot{m}_{1in} \gamma T_{1in} - \dot{m}_{2in} \gamma T_{2in} - \dot{m}_{out} \gamma T_{out} - T_1 (\dot{m}_{1in} - \dot{m}_{2in} - \dot{m}_{out}) \quad (13)$$

$$V_1 \frac{dp_1}{dt} = \dot{m}_{1in} \gamma R T_{1in} - \dot{m}_{2in} \gamma R T_{2in} - \dot{m}_{out} \gamma R T_{out} - p_1 \frac{dV_1}{dt} \quad (14)$$

其中当

$$\begin{cases} \dot{m}_{1in} \geq 0, T_{1in} = T_N \\ \dot{m}_{1in} < 0, T_{1in} = T_1 \end{cases}, \begin{cases} \dot{m}_{2in} \geq 0, T_{2in} = T_1 \\ \dot{m}_{2in} < 0, T_{2in} = T_2 \end{cases}, \begin{cases} \dot{m}_{out} \geq 0, T_{out} = T_1 \\ \dot{m}_{out} < 0, T_{out} = T_0 \end{cases}$$

$$\frac{dV_1}{dt} = A_{mid1} v_1 \quad (15)$$

3.2 气动液阀动态数学模型

气动液阀由一个控制腔及气孔、一个弹簧、一个活塞、两个推进剂入口和出口、一个阀体构成。该阀的推进剂出口紧挨喷注器入口，而喷注器出口又紧挨发动机燃烧室入口。高压气体进入控制腔以后，当气压增至一定值后，将同时推动作动腔活塞克服液压力、摩擦力和弹簧力而运动，从而使推进剂流入到喷注器容腔中。在电动气阀关闭时，气动液阀控制腔中的气体在弹簧力和液压力的作用下从电动气阀的排气孔中排出。活塞运动过程中，伴随着气体流量、压力、体积、密度、温度和活塞位移、速度、弹簧伸缩量的变化，因此，气动液阀动态过程应遵循质量守恒定律、能量守恒定律和牛顿第二定律^[3]。

为建立气动液阀动态过程的数学模型，先作如下假设：

(1) 由于该阀的动态过程极短，不考虑阀内的传热过程；

(2) 不考虑推进剂的可压缩性；

(3) 视控制腔内气体为理想气体。

3.2.1 运动数学模型

$$m_{12} \frac{dv_2}{dt} = F_{p2} - F_{12} - F_{s2} \quad (16a)$$

$$m_{12} \frac{dv_2}{dt} = F_{p2} + F_{12} - F_{s2} \quad (16b)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = v_2 \quad (17)$$

$$F_{p2} = (p_2 - p_0) A_{mid2} + (p_{2o} - p_0) A_{2o} + (p_{2f} - p_0) A_{2f} \quad (18)$$

$$F_{s2} = F_{s02} + C_2 x_2 \quad (19)$$

$$F_{12} = F_{f0} + f_2 v_2 \quad (20)$$

其中式 (16a) 为阀门打开过程运动件运动方程，(16b) 为阀门关闭过程运动件运动方程。

3.2.2 控制腔气体动态数学模型

$$m_2 \frac{dT_2}{dt} = \dot{m}_{2in} \gamma T_{2in} - T_2 (\dot{m}_{2in}) \quad (21)$$

$$V_2 \frac{dp_2}{dt} = \dot{m}_{2in} \gamma R T_{2in} - p_2 \frac{dV_2}{dt} \quad (22)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = A_{mid2} v_2 \quad (23)$$

$$\text{其中当} \begin{cases} \dot{m}_{2in} \geq 0, T_{2in} = T_1 \\ \dot{m}_{2in} < 0, T_{2in} = T_2 \end{cases}$$

关于气体质量流量 \dot{m}_{1in} 、 \dot{m}_{2in} 和 \dot{m}_{out} 的求解，本文考虑了超临界、亚临界，气体正向、反向流动四种情况。具体数学模型如下

当 $p_1 \leq p_N$ 时

$$\dot{m}_{1in} = \begin{cases} \mu_{1in} \frac{p_N A_{1in}}{\sqrt{RT_N}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \frac{p_1}{p_N} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \mu_{1in} \frac{p_N A_{1in}}{\sqrt{RT_N}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_N} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_1}{p_N} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \frac{p_1}{p_N} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (24)$$

$p_1 > p_N$ 时

$$\dot{m}_{1in} = \begin{cases} -\mu_{1in} \frac{p_1 A_{1in}}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \frac{p_N}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ -\mu_{1in} \frac{p_1 A_{1in}}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_N}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_N}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \frac{p_N}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (25)$$

当 $p_2 \leq p_1$ 时

$$\dot{m}_{2in} = \begin{cases} \mu_{2in} \frac{p_1 A_{2in}}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \mu_{2in} \frac{p_1 A_{2in}}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (26)$$

$p_2 > p_1$ 时

$$\dot{m}_{2in} = \begin{cases} -\mu_{2in} \frac{p_2 A_{2in}}{\sqrt{RT_2}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \frac{p_1}{p_2} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ -\mu_{2in} \frac{p_2 A_{2in}}{\sqrt{RT_2}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \frac{p_1}{p_2} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (27)$$

当 $p_0 \leq p_1$ 时

$$\dot{m}_{\text{out}} = \begin{cases} \mu_{\text{out}} \frac{p_1 A_{\text{out}}}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, & \frac{p_0}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \mu_{\text{out}} \frac{p_1 A_{\text{out}}}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \frac{p_0}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (28)$$

$p_0 > p_1$ 时

$$\dot{m}_{\text{out}} = \begin{cases} -\mu_{\text{out}} \frac{p_0 A_{\text{out}}}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, & \frac{p_1}{p_0} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ -\mu_{\text{out}} \frac{p_0 A_{\text{out}}}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \frac{p_1}{p_0} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (29)$$

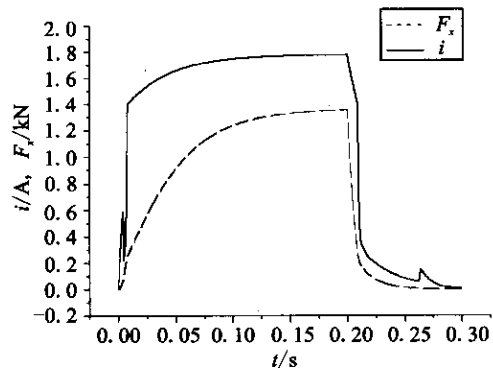
求解电动气阀的动态微分方程组, 得出 x_1 、 v_1 , 实际上是求出了影响气动液阀控制腔气体流入量及控制腔容积的外界因素。在此基础上, 才可以求解气动液阀的动态数学模型。但是, 电动气阀的活塞前压强和气动液阀的运动有关, 所以电动气阀和气动液阀的动态微分方程组要联立求解。

4 仿真计算与结果分析

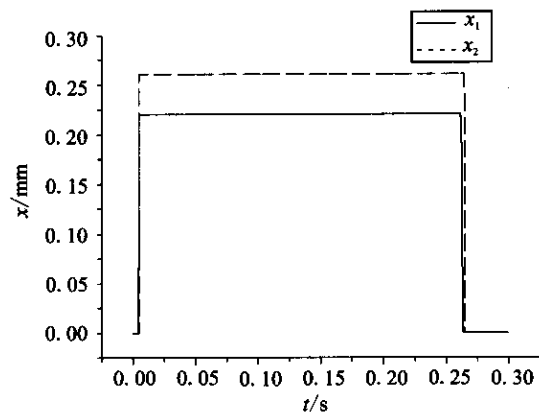
针对电磁阀具体已知参数, 对其开启和关闭过程进行仿真计算, 输入电压 24V, 作用时间为 0.2s, 仿真时间为 0.3s, 得出电磁阀动态响应特性, 仿真结果如图 2 所示。图中分别给出了电流、电磁力以及电动气阀和气动液阀活塞位移随时间变化的曲线。

由图可知, 从线圈通电, 电流按指数规律增长到吸动电流为止的过程, 称为衔铁的吸动触动过程。这个阶段吸力小于或等于反力, 衔铁尚未运动。位移 x_1 、 x_2 , 速度 v_1 、 v_2 均为 0, 控制腔压力 p_1 、 p_2 , 体积 V_1 、 V_2 无变化。当吸力大于反力, 衔铁开始运动, 直到衔铁与静铁芯完全闭合, 称为吸动运动过程。运动过程中, x_1 、 v_1 大于 0, p_1 、 p_2 、 V_1 也随之增大, 由于衔铁速度 v_1

的逐增, 产生运动反电势, 使电流下跌, 直至衔铁终止运动, 电动气阀开启响应时间为 4.53ms。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 1.7757A。当 p_2 所产生的压强力大于气动液阀的反力时, 气动液阀活塞开始运动, x_2 、 v_2 均大于 0, V_2 也开始增大。 x_2 持续增大到活塞最大行程, 气动液阀开启响应时间为 4.98ms。



(a) 电流和电磁力随时间变化曲线



(b) 衔铁和活塞位移随时间变化曲线

图 2 电磁阀响应特性曲线

Fig. 2 The curves of the valve characteristics

线圈断电以后, 电流下降, 跟吸动过程一样, 释放过程分为释放触动过程和释放运动过程。由仿真结果知, 电动气阀关闭响应时间为 63.36ms, 气动液阀关闭响应时间为 65.09ms。

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、气源压力、反力因素以及尺寸参数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

应能力提供依据。

4.1 线圈励磁电压对电磁阀响应特性的影响

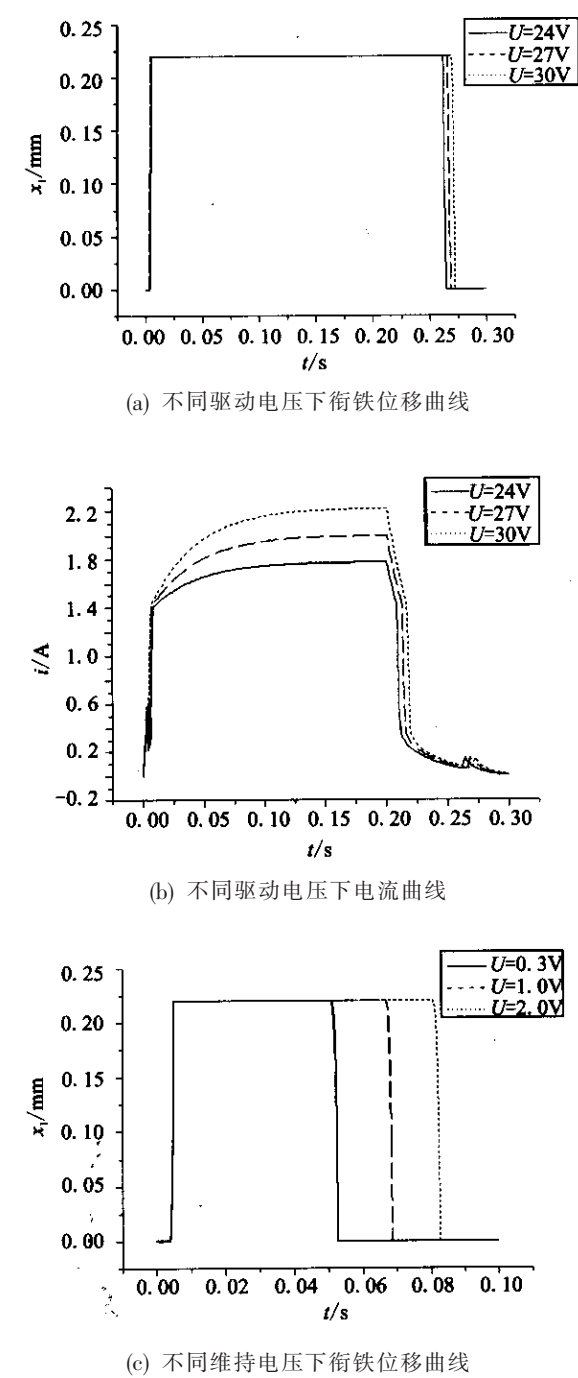


图 3 线圈励磁电压对电磁阀响应特性的影响

Fig.3 The curves of the valve characteristics for different voltages

从图 3 (a)、(b) 和表 1 可以清楚地看出：输入额定电压越高，在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就会越快获得最大的作用力，阀开启时间就越短；但是，由于软磁材料的剩磁特性，切断电压后会剩下较大的磁性，使得阀关闭时间加长，同时，电压的增大，也使得线圈和控制回路中的电流峰值过高，容易烧毁线圈和击穿电子元器件。所以应当适当的提高输入电压来提高电磁阀的响应能力。

表 1 驱动电压对电磁阀响应特性的影响

Tab.1 Effect of driving voltage on valve characteristics			
驱动电压 /V	开启时间/ms	关闭时间/ms	电流峰值 /A
24	4.53	63.36	1.7757
27	3.98	67.65	1.9968
30	2.54	71.53	2.2179

为了达到电磁阀响应速度加快和维持阶段电磁力可以降低的要求，电磁阀驱动时使用了分阶段高、低电压驱动方式，即在衔铁运动之初，使用高的电压，加大驱动电流，使衔铁快速吸合；当衔铁吸合后，使用低电压维持。由于在电磁阀吸合后，电磁铁与衔铁之间气隙减小、磁阻降低，较低的维持电流不仅可保持电磁阀的可靠吸合，还能降低电磁铁的能耗和线圈的发热，并有利于衔铁的快速复位，缩短电磁阀的关闭响应时间^[4]。下面研究维持电压对电磁阀响应特性的影响。

表 2 维持电压对电磁阀响应特性的影响

Tab.2 Effect of holding voltage on valve characteristics		
维持电压/V	开启时间/ms	关闭时间/ms
2.0	4.53	32.53
1.0	4.53	18.59
0.5	4.53	2.580
0.4	维持电压不起作用	

图 3 (c) 和表 2 是在驱动电压 24V，作用时间 4ms，降到维持电压，到 50ms 时电压再降为 0 的条件下得出的仿真结果。结果表明：降低维持电压能加速电磁阀的关闭，但是这种降低要有一

定的限度，即维持电压要能产生足够的电磁吸力以保证电磁阀维持全开。

4.2 线圈匝数和电阻对电磁阀响应特性的影响

表 3 线圈匝数对电磁阀响应特性的影响
Tab.3 Effect of the number of winding circle on valve characteristics

线圈匝数/匝	开启时间/ms	关闭时间/ms
120	电磁阀无法正常工作	
150	3.39	9.00
170	3.20	11.2
180	3.19	12.5
190	3.20	13.8
200	3.22	15.2
300	3.83	32.9
390	4.53	62.7

表 3 是额定电压 24V，作用时间 0.1s， $R_w=13.5$ 的条件下得出的结果。从表中可以看出对于某一电阻值，随着匝数的增加，电动气阀打开时间呈先减小后增大的趋势，而电动气阀关闭时间随着匝数的增加而增加。那么就有一个匝数最优值，可以使电动气阀开启的响应时间最短，而关闭时间不至于太长。当匝数超过这个值，电动气阀开启的响应时间明显变长，而当匝数低于这个值，电动气阀开启的响应时间也会变长，甚至使电磁阀达不到足够的工作安匝数而无法正常工作。由仿真结果得出，在该条件下电磁阀匝数最优值为 180 匝。

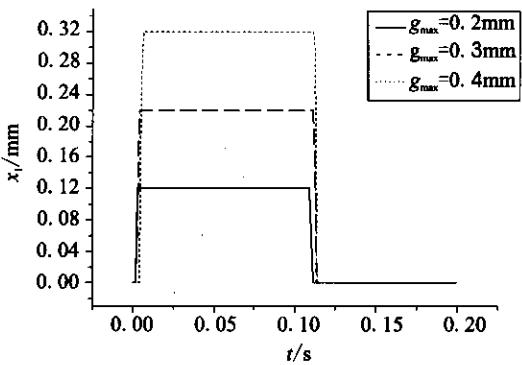
表 4 电阻对电磁阀响应特性的影响
Tab.4 Effect of resistance on valve characteristics

电阻 / Ω	开启时间 /ms	关闭时间 /ms	电流峰值 /A
10.0	2.65	16.6	2.4000
13.5	3.19	12.5	1.7778
15.0	3.55	11.3	1.6000
20.0	电磁阀无法正常工作		

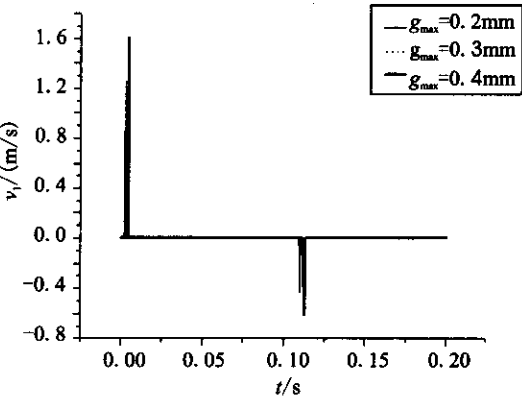
从表 4 可知：随着电阻的增加，动态电流峰值明显减小，电动气阀开阀响应时间加长，而关

阀响应时间减少。因此，电阻值的大小是影响电磁阀动态响应特性的一个重要因素。要选择合适电阻值的线圈，既保证电磁阀有良好的响应特性，又能够限制峰值电流。

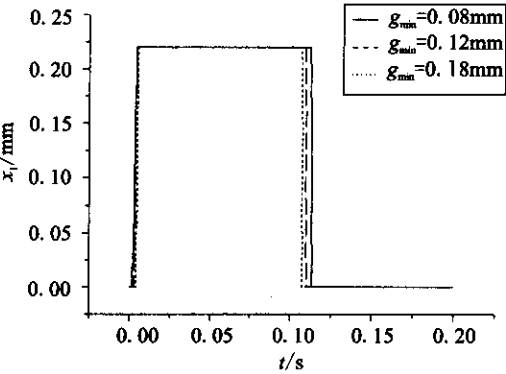
4.3 主工作间隙和残余间隙对电磁阀响应特性的影响



(a) 不同主工作间隙下衔铁位移曲线



(b) 不同主工作间隙下衔铁速度曲线



(c) 不同残余间隙下衔铁位移曲线

图 4 气隙对电磁阀响应特性的影响
Fig. 4 The curves of the valve characteristics for different air gap

由图 4 (a)、(b) 可以看出：主工作间隙越大，衔铁行程越长，电动气阀开启和关闭的响应时间就越长。因为，当主工作间隙增大时，初始气隙加大，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。当主工作间隙大到一定的程度，电磁阀将不能提供足够的安匝数，而使电磁阀无法正常工作。主工作间隙应该被限制在一定的范围之内，只要有微小的超出，将导致电磁吸力迅速下降，而不能克服反力使衔铁动作。对于本电磁阀，当主工作间隙超过 0.4mm 时，将无法正常工作。另外，随着主工作间隙的增大，衔铁行程末速度增大，衔铁碰撞前具有的动能越大，将不利于电磁铁的寿命。主工作间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也很大。

由图 4 (c) 知：当衔铁行程不变时，残余间隙减小意味着初始工作气隙减小，在开启过程中电磁铁能产生更大的电磁吸力，使电磁阀开启加快；在关闭时，小的残余间隙加大了剩磁的影响，使电磁阀关闭响应时间加长。若衔铁在吸合状态下气隙为零，剩磁将产生一定的剩余吸力阻止衔铁释放；保留一定的残余间隙，使断电时整个磁路仍有较大的磁阻，这样可以基本消除剩磁。因此，要保证电磁阀有短的开启和关闭响应时间，必须综合考虑。

4.4 气源压力对电磁阀响应特性的影响

表 5 气源压力对电磁阀响应特性的影响

Tab.5 Effect of pressure of the compressed gas on valve characteristics

气源压力 /MPa	电动气阀开启时间 /ms	电动气阀关闭时间 /ms	气动液阀开启时间 /ms	气动液阀关闭时间 /ms
8.5	3.19	12.49	3.64	14.19
6.5	3.20	8.440	3.77	9.840
4.5	3.21	6.620	4.10	7.560

由表 5 的仿真数据知：随着高压气体压力的

减小，压强随之减小，则电磁力需要经过较长一段时间的增长才能使衔铁运动，所以电动气阀开启时间加长，同一时刻衔铁运动速度较小，但是衔铁行程的末速度几乎相等；同时，高压气体是推动气动液阀活塞的动力来源，随着高压气体压力的减小，气动液阀控制腔压力随之减小，气动液阀开启响应变慢，甚至推不动活塞，但活塞末速度较小，有利于气动液阀工作寿命的延长。而关闭时，电动气阀响应时间则随着高压气体压力的减小而缩短，衔铁行程的末速度增大；气动液阀响应时间随着高压气体压力的减小而缩短，活塞末速度几乎相等。所以，高压气体压力的选取要综合考虑电磁阀的响应能力与其工作寿命。

4.5 反力因素对电磁阀响应特性的影响

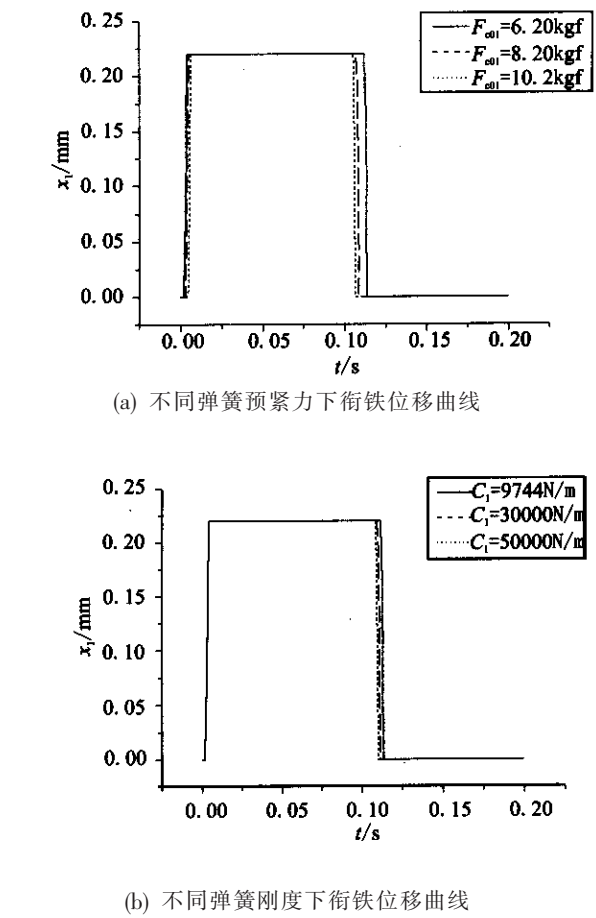


图 5 反力因素对电磁阀响应特性的影响

Fig.5 The curves of the valve characteristics for different reaction factors

由图 5 知：弹簧预紧力对电磁阀响应特性的影响与高压气体压力的影响相反。弹簧预紧力越大，阀的开启响应越慢，而关闭响应越快。为了加速电磁阀的关闭响应时间可适当加大预紧力，但过大的预紧力将造成阀门开启过程的迟缓，甚至吸不动衔铁，过小的预紧力可能使得弹簧回力不足而阀门无法关闭。因此，要确定合理的弹簧预紧力的大小，必须兼顾阀的开启和关闭时间。

弹簧刚度对阀开启关闭的影响不大。因为阀芯的运动行程非常小，弹簧力随阀芯运动的变化很小。总的来说，弹簧刚度越大，阀的开启响应越慢，而关闭响应越快。

4.6 尺寸参数对电磁阀响应特性的影响

表 6 尺寸参数对电磁阀响应特性的影响

Tab.6 Effect of size parameters on valve characteristics

尺寸参数 气孔直径 /mm	气动液阀 开启时间 /ms	开启末 速度 /(m/s)	气动液阀 关闭时间 /ms	关闭末 速度 /(m/s)
$d_{in}=1.50$	3.64	1.8501	14.19	1.0877
$d_{2in}=2.00$				
$d_{out}=0.75$				
$d_{in}=0.50$	7.15	0.2028	7.21	1.1165
$d_{2in}=2.00$				
$d_{out}=0.75$				
$d_{in}=1.50$	4.35	1.3021	15.08	0.9078
$d_{2in}=0.50$				
$d_{out}=0.75$				
$d_{in}=1.50$	3.60	1.9565	18.02	0.8651
$d_{2in}=2.00$				
$d_{out}=0.50$				

由表 6 可以看出：电动气阀控制腔入口直径大小 (d_{in}) 直接控制进入电动气阀控制腔的气体流量，从而影响控制腔内的充气过程。电动气阀

控制腔入口直径越大，开阀响应越快，活塞末速度大；而关阀响应慢，活塞末速度小。

排气口直径 (d_{out}) 越大，开阀时响应越慢，关阀时响应越快。与电动气阀控制腔入口直径相反。

气动液阀控制腔入口直径的大小 (d_{2in}) 将控制进出气动液阀控制腔的气体流量，从而影响控制腔内的充气与放气过程。充气孔直径较大时，阀门响应较快，但是活塞行程末速度也大。

5 结束语

本文建立了电磁阀的非线性数学模型，并分析了影响电磁阀动态响应特性的各个因素，找出了其中的变化规律。需要指出的是，该仿真模型对电磁阀的仿真是在一定程度上的近似模拟，在考虑到涡流、铁芯磁阻变化以及阀芯间的弹性碰撞等影响时，该模型还需要进一步修正。

参考文献：

[1] 汪志刚，等. 电控柴油机用高速电磁阀的仿真研究[J]. 机电设备，2003, (4).
[2] 沈赤兵，等. 电动气阀动态特性及反力因素的影响 [J]. 推进技术，1996, (6).
[3] 沈赤兵，等. 尺寸参数对气动液阀启动特性的影响[J]. 上海航天，1996, (6).
[4] 宋进，等. 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，2002, 8(2).
[5] 尤裕荣，曾维亮. 逆向卸荷式气体减压阀的动态特性仿真[J]. 火箭推进，2006, 32(3).

(编辑:陈红霞)