

两位五通电动气阀动态特性研究^{*}

陶玉静, 范才智, 田章福, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 将电动气阀的工作过程分为电动过程和气动过程, 建立了两过程的动力学模型。分别对电动过程和气动过程的响应特性进行仿真, 并与试验结果比较, 验证了动力学模型的正确性。分析了控制气体压力、最大气隙以及工作电压等因素对电动过程的影响。

关键词: 电动气阀; 电动过程⁺; 气动过程⁺; 动力学模型⁺; 动态特性

中图分类号: V434.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 06-0542-04

Study on the dynamic characteristic of the electropneumatic valve

TAO Yu-jing FAN Cai-zhi TIAN Zhang-fu WANG Zhen-guo

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The action of the electropneumatic valve was divided into the electromotion and the pneumatic process. Dynamic models of these two processes were established. The response characteristic of the electromotion and the pneumatic process was simulated. Comparison with the cold test results showed that the dynamics models were correct. Effects of the pressure of control gas and voltage etc. on the electromotion are analyzed.

Key words Electropneumatic valve; Electromotion⁺; Pneumatic process⁺; Dynamic models⁺; Dynamic characteristic

1 引 言

液体火箭发动机上常利用电动气阀驱动气动阀。这两种阀门结构复杂, 动态特性丰富, 在实际应用中, 常简单地将阀门视为一个变截面的孔板阻力元件, 不考虑其动态特性^[1~5]。但阀门的动态特性对推进剂供应系统的流体瞬变过程有重要影响, 是时序设置的关键因素。阀门模型过于简单, 对于起动, 特别是转工况等瞬变过程的分析往往不够精确。因此, 有必要建立精确细致的阀门模型。

从有关文献来看, 对用于系统分析的两位五通常开式电动气阀的动力学模型几乎没有研究。本文针对试验系统中的电动气阀, 将其工作过程分为电动过程和气动过程, 分别建立其动力学模型。对电动过程和气动过程的响应特性进行仿真, 并与试验结果比较。最后分析了控制气体压力、最大气隙以及工作电

压等因素对电动过程的影响。

2 电动气阀工作原理

试验中用到的电动气阀为两位五通常开式。外部结构、内部结构如图 1~3 所示。

根据电动气阀的工作特性, 将其动作过程分为电动过程和气动过程。阀门初始时在弹簧预紧力和控制气体压力下, 顶杆和衔铁在气隙最大处。当电动气阀通电后, 衔铁上产生磁力并逐渐增大, 大于临界力时, 衔铁开始动作, 直至完全吸合, 这一过程为电动过程。之后, 进入气动过程, 控制气体流向如图 3 通电状态所示。断电时, 阀门的动作则相反。

3 电动过程动力学模型

文中只对电动气阀开启时电动过程的基本方程进行详细推导, 关闭时的推导过程完全一样。

^{*} 收稿日期: 2005-12-23 修订日期: 2006-02-21。

基金项目: 国家“八六三”项目 (2003AA722011)。

作者简介: 陶玉静 (1977—), 女, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机系统建模, 仿真与动力学特性分析。

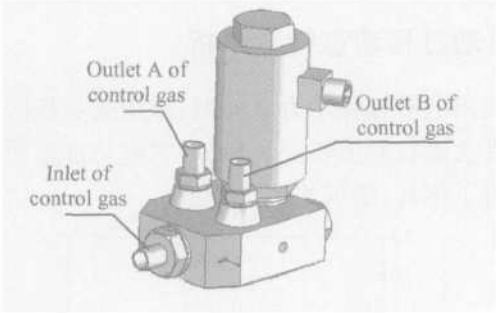


Fig 1 Schematic of the solenoid valve

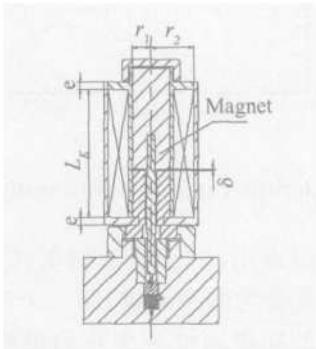


Fig 2 Schematic of the winding

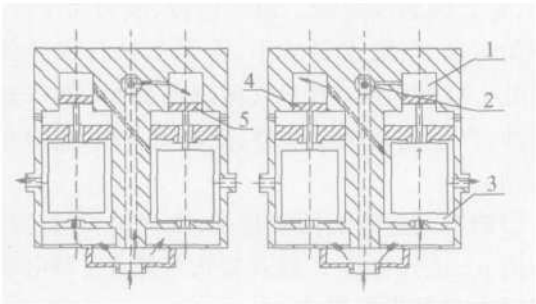


Fig 3 Schematic of the base of the solenoid valve

1) Cavity C; 2) Inlet of control gas of cavity C;
3) Cavity D; 4) Piston A; 5) Piston B

基本假设:

(1)不考虑气体的沿程损失;

(2)由于阀动作时间很短以及密封腔体积很小,故认为气体充填和排出密封腔时腔内压力、密度场等为均匀场。

(3)线圈电阻为一定值。

根据牛顿第二定律、质量守恒定律、麦克斯韦方程等可以建立电气阀开启时电动过程的动力学方程如下

主要方程

$$\begin{cases} d\phi/dt = U - iR \\ dv/dt = [F_x - F_f(x, v)] / \sum m \\ dx/dt = v \end{cases} \quad (1)$$

式中 ϕ 为磁链, v 为衔铁运动速度, F_x 为吸力, F_f 为反力, $\sum m$ 为衔铁、顶杆和密封体质量总和, 反力 $F_f(x, v) = p_s A + F_{f0} + cx$ 式中 p_s 为控制气体压力, F_{f0} 为弹簧预紧力, c 为弹簧刚度。

辅助的磁路方程

$$\begin{cases} iN = \frac{\phi_\delta}{\Lambda_\delta} + H_c L_c \\ \phi = N \cdot \phi_c \\ F_x = \frac{\phi_\delta^2}{2\mu_0 S} \\ i = \frac{N}{N} \\ \sigma = \frac{\phi_c}{\phi_\delta} \end{cases} \quad (2)$$

式中 N 为磁通势, Φ_δ 为气隙磁通量, Λ_δ 为气隙磁导, H_c 为磁场强度, L_c 为磁路长度, Φ_c 为磁路中磁通量, μ_0 为真空磁导率, S 为导磁体截面积, 瞬间气隙 $\delta = \delta_{nax} - x$, x 为衔铁位移。

磁漏系数为

$$\sigma = 1 + \frac{\delta}{r_1} \left[\frac{r_1 + r_2}{\pi r_1} \left| \frac{\pi L_k}{8(r_2 - r_1)} + \frac{2(r_2 - r_1)}{\pi L_k} \right| + \frac{0.67 + \frac{0.13\delta}{r_1}}{1.465 \lg \frac{r_2 - r_1}{\delta}} \right]$$

式中 L_k 为线圈组件高度。气隙磁导 $\Lambda_\delta = \mu_0 S / \delta$

整理上述基本方程, 可得到电气阀开启时电动过程的非线性动力学模型

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{dt} = - \frac{R\phi}{\Lambda_\delta \sigma^2 N^2} - \frac{H_c L_c R}{N} + U \\ \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{\phi^2}{2N^2 \sigma^2 \mu_0 S \sum m} - \frac{F_{f0} + p_s A + cx}{\sum m} \end{cases} \quad (3)$$

4 气动过程动力学模型

电动过程描述的是衔铁的运动过程, 包括衔铁的吸合及复位过程。而气动过程描述的是活塞的运动以及控制气体的流动。对下游气动液阀的驱动作用, 正是通过气动过程来实现的。

气动过程建立动力学模型时, 也遵循电动过程建模时的基本假设。需要关注的是四个控制腔中控制气体压力和流量的变化。

根据气体动力学,建立控制腔中控制气体的动量方程、连续方程以及能量方程。根据牛顿第二定律,建立活塞的运动方程。经整理,控制腔 C 中的基本动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{K-1}{V} (I_{in}\dot{m}_{in} - I_{out}\dot{m}_{out} + \frac{K}{K-1}p_1A_2w) \\ \frac{d\rho}{dt} = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \rho A_2w)/V \\ \frac{dw}{dt} = (p_1A_1 - p_1A_2 - fw)/m \\ \frac{dx}{dt} = w \end{cases} \quad (4)$$

式中 p_1 为控制腔 C 内压力, K 为比热比, A_2 为活塞横截面积, w 为活塞速度, ρ 为控制腔 C 内气体密度, A_1 为控制腔 D 气体入口面积, x 为活塞位移。而

$$\begin{cases} \dot{m}_{out} = A_3 p_1 \sqrt{\frac{2K}{RT(K-1)}} \sigma^2 - \sigma^{\frac{k+1}{k-1}}, \sigma_t < \sigma \leq 1 \\ \dot{m}_{out} = A_3 p_1 \sqrt{\frac{k}{RT}} \frac{2}{K+1} \sigma^{\frac{k+1}{k-1}}, \sigma \leq \sigma_t \\ \sigma_t = \left| \frac{2}{k+1} \right|^{\frac{k-1}{k+1}}, \sigma = \frac{p_0}{p_1}, T = p_1 R / \rho \end{cases}$$

式中 A_3 为线圈组件缝隙这最小节流面积, μ 为流量系数。控制腔 D 中的动力学方程与控制腔 C 类似, 这里不再给出。

5 模型验证

图 4 是电动气阀出口压力的试验和仿真曲线, 0 ms 时发出开阀指令, 700 ms 时发出关阀指令。从图中可以看出, 仿真曲线和试验曲线基本一致, 这说明所建的电动气阀动力学模型可以用于实际的仿真中。通过对试验数据以及仿真数据的整理, 电动气阀的延迟时间大约在 160 ms ~ 290 ms。

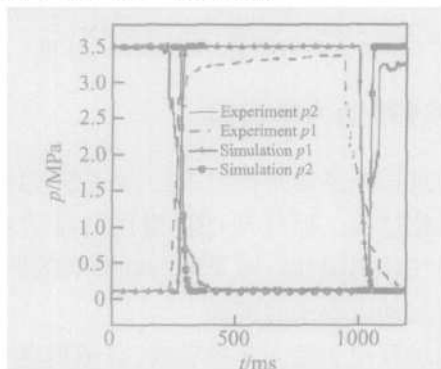


Fig 4 Comparison of simulation and test

6 电动过程动态特性分析

利用电动过程动力学模型, 采用变步长四阶龙格-库塔法进行数值积分, 对开启时电动过程的响应特性进行了仿真, 结果如图 5 所示。

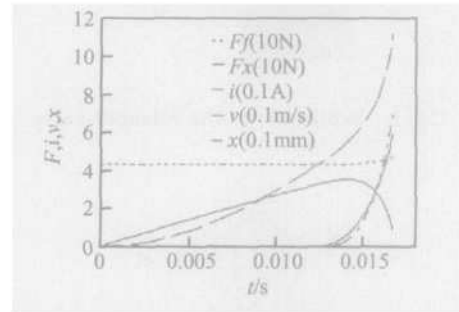


Fig 5 Characteristic curve of electro motion when open

从图 5 可以看出, 对于直流螺管式电磁铁而言, 其吸动过程通常分为两个阶段: 第一个阶段是从线圈通电和电流增长到吸动电流为止的过程。这个过程电流按指数规律上升吸力小于或等于反力, 衔铁尚未动作, 称之为触动过程。第二阶段, 吸力大于反力, 衔铁开始运动, 气隙逐渐减小, 直至衔铁行程达到最大位置处。在此阶段, 由于气隙逐渐减小, 衔铁速度逐渐增加, 产生运动反电动势, 使电流下跌, 直至衔铁终止运动。

影响电动过程的因素很多, 本文主要讨论控制气体压力 p_0 、工作电压 U 以及最大气隙 δ_{max} 对电动气阀开启时电动过程的影响。

6.1 控制气体压力的影响

图 6 是不同控制气体压力 p_0 下吸力、反力及衔铁速度的变化曲线。从图中可以看出, 在衔铁运动前, 控制压力对吸力增大过程的影响是相同的。但控制压力越大, 吸力需要越长的时间才能达到相应的反力 ($F_0 + pA$), 电动过程需要的时间就越长。

6.2 工作电压的影响

从图 7 可以看出, 控制电压越大, 电动过程的响应越快, 衔铁末速度也越大。但末速度过大, 会缩短电动气阀的使用寿命。因此, 在实际应用中, 应选取合适的电压参数。

6.3 最大气隙的影响

最大气隙 δ_{max} 是电动气阀的一个重要结构参数, 从图 8 和图 9 可以看出, 当最大气隙较小时, 响应越快, 衔铁能较快的吸合, 并且触动电流, 动作过程中的峰值电流以及行程中止时的电流都较小, 这样电流为了增长到相应的触动电流需要的时间就越短, 也即响

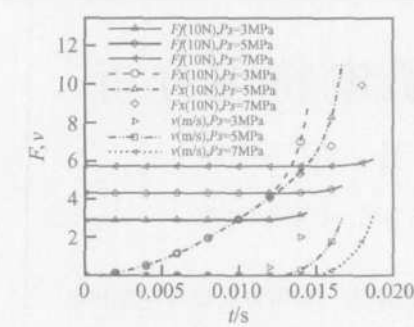


Fig. 6 Curve of force and speed at different p_1

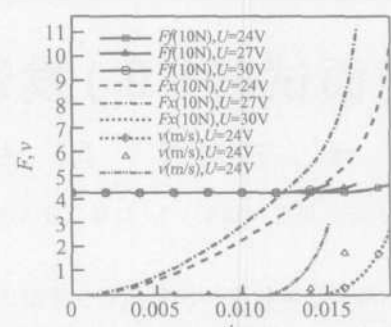


Fig. 7 Curve of force and speed at different U

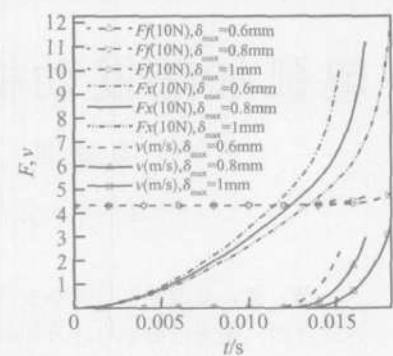


Fig. 8 Curve of force and speed at different $\delta_{\max}$

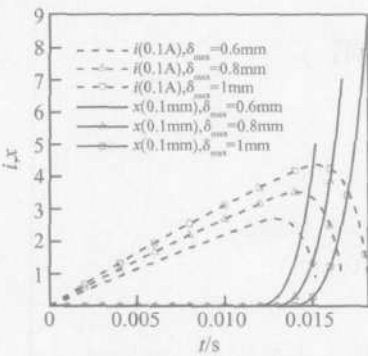


Fig. 9 Curve of i and x at different $\delta_{\max}$

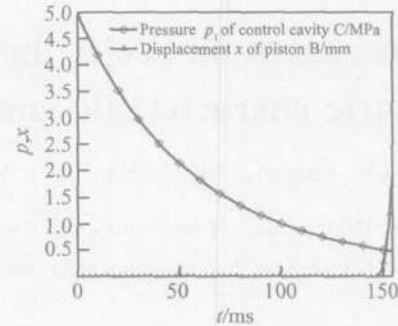


Fig. 10 Pressure of cavity C and displacement of piston B when open

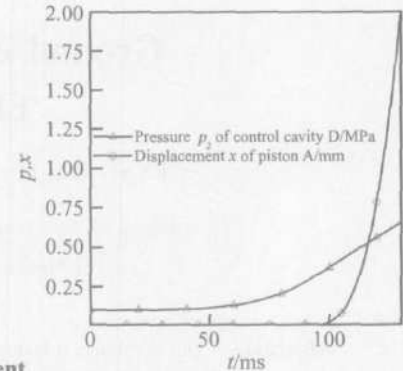


Fig. 11 Pressure of cavity D and displacement of piston A when open

应越快。还可以看出,当最大气隙较小时,吸力与反力之差较小,从而行程结束时,衔铁的末速度较小,这将有利于延长电气气阀的机械寿命。

7 气动过程响应特性分析

图 10 图 11 为电气气阀开启时控制腔 C、D 压力及活塞 A、B 位移的变化曲线。从图 11 可以看出,当电气气阀运动结束时,与下游气动液阀相连的控制腔的压力很低,还不足以使得气动液阀开始动作。这说明可以将电气气阀和气动液阀进行解耦处理,只需将气动液阀控制腔内初始压力设置为电气气阀动作结束后相应的压力即可。

8 结 论

- (1)控制气体压力越大,开启时电动过程响应越快,关闭时电动过程响应越慢。
- (2)最大气隙越大,电动过程响应越慢。
- (3)工作电压越高,电动过程响应越快。

(4)电气气阀的延迟时间约为 160 ms~ 290 ms。

参考文献:

[1] 刘 昆. 分级燃烧循环液氧/液氢发动机系统分布参数模型与通用仿真研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1999

[2] 谭建国. 三组元液体火箭发动机系统设计与动态特性研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003

[3] Ordonneau G. Low frequency oscillation phenomena during VULCAN shutdown transient[R]. AIAA 2001-3543

[4] LIU Kun, ZHANG Yulin. A study on versatile simulation of liquid propellant rocket engine systems transients[R]. AIAA 2000-3771

[5] Tarafder A, Sarangi S. CRESO-LP: A dynamic simulator for liquid-propellant rocket engines[R]. AIAA 2000-3768

[6] 方德寿, 方 交, 杨永达. 实用电子技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999

(编辑: 张雅凤)