

电动气阀动态特性及反力因素的影响*

沈赤兵 陈新华 陈启智

(国防科技大学航天技术系, 长沙, 410073)

摘 要: 建立了电动气阀吸动过程的数学模型并进行了动态特性的数值计算, 详细分析了反力因素对电动气阀动态特性的影响。计算结果表明: 该阀的衔铁在被触动后能很快地吸到最小气隙处; 适当地减小压缩气的入口压力和弹簧预紧力有利于提高电动气阀的响应能力, 有利于延长电动气阀的使用寿命。

主题词: 电动气动阀, 液体推进剂火箭发动机, 动态特性, 数值计算

分类号: V432

THE INFLUENCE OF REACTION FACTORS ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ELECTROPNEUMATIC VALVES

Shen Chibing Chen Xinhua Chen Qizhi

(Dept. of Aerospace Technology, National Univ. of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: The mathematic model is built for the attracting process of the electropneumatic valve, numerical calculation of the dynamic characteristics is presented, and the influence of reaction factors on the dynamic characteristics of the valve is analyzed in detail. The calculated results show that the armature of the valve can be attracted more quickly to the minimum width of solenoid air gap after the circuit is turned on and the armature is touched, and to improve the response characteristics of the valve and to prolong the service life of the valve, it is favourable that the inlet pressure of the compressed gas and the precompression of the spring be properly decreased. The conclusions obtained may be used for reference to the design and manufacture of new electropneumatic valves and solenoid valves.

Subject terms: Electropneumatic valve, Liquid propellant rocket engine, Dynamic characteristic, Numerical calculation

1 前 言

在小推力液体火箭发动机中, 电动气阀实现了发动机的重复启动和脉冲工作。发动机工作时, 在稳定的参数输入条件下, 电动气阀必需保持稳定的参数输出, 在启动瞬间或有外界干扰的情况下(如反力因素、电压发生变化时), 电动气阀必需在很短时间内作出反应, 使输出参数迅速稳定并保持在设计允许的范围内, 以保证发动机正常工作, 这就需要对电动气阀进行动态特性分析, 还应分析干扰因素对电动气阀动态特性的影响。

* 本文1995年11月16日收到, 修改稿1996年3月20日收到

2 电动气阀的数学模型

根据电路上的电压平衡方程,运动上的牛顿第二定律,磁场上的麦克斯韦方程,以及在热力学方面的热平衡方程,从这些方程存在的相互联系,构成了描述动态过程的数学模型。由于动态过程历时极短,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。以下为电动气阀吸合过程的数学模型:

$$\frac{d\Psi}{dt} = U - iR; \quad \frac{dV}{dt} = \frac{F_x - F_t(X, V)}{m}; \quad \frac{dX}{dt} = V$$

初始条件为:

$$\Psi|_{t=0} = \Psi_0 = 0, i|_{t=0} = i_0 = 0; \quad V|_{t=0} = V_0 = 0, X|_{t=0} = X_0 = 0$$

利用四阶龙格-库塔法求解,其中 Ψ 、 X 、 i 、 F_x 都属于磁路参数(磁链、衔铁位移、电流、吸力),在已知时刻 t 的 Ψ 、 X 条件下,可从以下的磁路非线性联立方程组中求解出 i 、 F_x 。

$$iN = \frac{\phi_\delta}{\Lambda_\delta} - H_c L_c; \quad \Psi = N\phi_c; \quad F_x = \frac{\phi_c^2}{2\mu_0 S}; \quad i = \frac{iN}{N}; \quad \sigma = \frac{\phi_c}{\phi_\delta}$$

上述各式中: L_c 为磁路长度,如图2中的虚线所示,电磁铁的尺寸参数也标注于图1中。 $\Lambda_\delta = \mu_0 S / \delta$; $\delta = \delta_{\max} - X$ 。

对于直流螺管式电磁铁,漏磁系数^[1]为

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

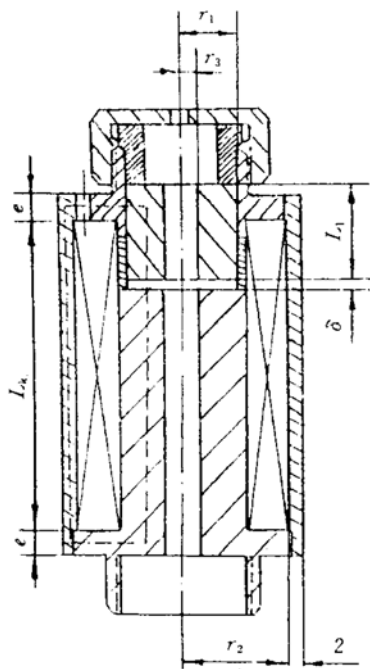


Fig. 1 Electromagnetism mechanism schematic of the electropneumatic valve

$$S = \pi(r_1^2 - r_3^2)$$

$B_c = \phi_c / S$, 对磁化曲线用分段线性插值法查找 B_c 所对应的 H_c 。 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

计算之前,根据液体火箭发动机常用电动气阀的结构参数,设定了电动气阀电磁铁的尺寸参数。

由导磁体的磁滞回线可知,电动气阀在断电时,磁路中的磁感应强度并不为0。为消除剩磁,在计算中取非工作气隙 $\delta_{\min} = 0.3 \text{mm}$, 又称 $\delta_{\min}$ 为最小气隙。

电动气阀在开启时应能克服反力作用,而反力由弹簧预紧力 F_{t0} 和入口气体压力 p 组成,反力特性可表示为: $F_t = CX + F_{t0} + PA$ 。其中 $A = \pi(r_4^2 - r_5^2)$, $C = 5232 \text{N/m}$, $p = 6.1 \text{MPa}$, $r_4 = 1.0 \text{mm}$, $r_5 = 0.5 \text{mm}$ 。

3 吸动过程动态特性分析

对于直流螺管式电磁铁而言,其吸动过程的电流变化曲线如图2^[2]所示。吸动过程的第一阶段从线圈通电和电流

增长到吸动电流为止,即图2中的第Ⅰ段,这个阶段吸力小于或等于反力,衔铁尚未运动,称之为触动过程。在这段,

$$i = U(1 - e^{t/T})/R = I_s(1 - e^{t/T}); T = L/R; t_c = T \cdot \ln[K/(K - 1)]$$

式中:动作安匝储备系数 $K = I_s/i_p$, i_p 为峰值电流即图2中 a 点的电流。

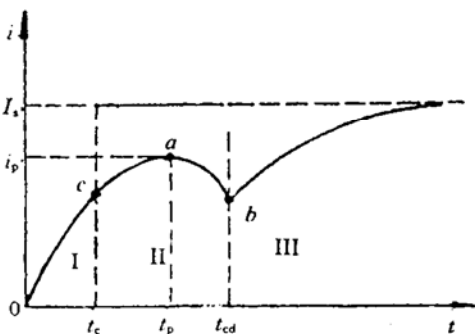


Fig. 2 The curve of electric current in the attracting process

第二阶段,吸力大于反力,衔铁开始运动,气隙逐渐减小,直至衔铁与静铁心完全闭合,称之为运动过程。图2中 cb 段为第二阶段,用第Ⅱ段表示。在此阶段,由于气隙逐减,衔铁速度逐增,产生运动反电动势,使电流下跌,直至衔铁终止运动。图中 a 点的电流为 i_p ,相应的时间 t_p 称为峰值电流时间。图中 b 点的时间为吸动时间 t_{cd} ,此点的电流为 i_b ,在此点时,衔铁运动至最小气隙瞬间,衔铁与静铁芯完全闭合。 b 点之后,电流又按新的指数规律上升,直到 $i = I_s$,达到稳态。 b 点至稳态这一段用第Ⅲ段表示在图2中,此段并不属于吸动过程。

(1) 电流特性:在上节设定的已知条件下, $I_s = 1.5A$, $i_p = 0.3708A$, $K = 4.045$,从图3可知, i 从0开始增至 i_p ,然后下降至 i_b ,动作时间 $t_{cd} = 7.7ms$ 。

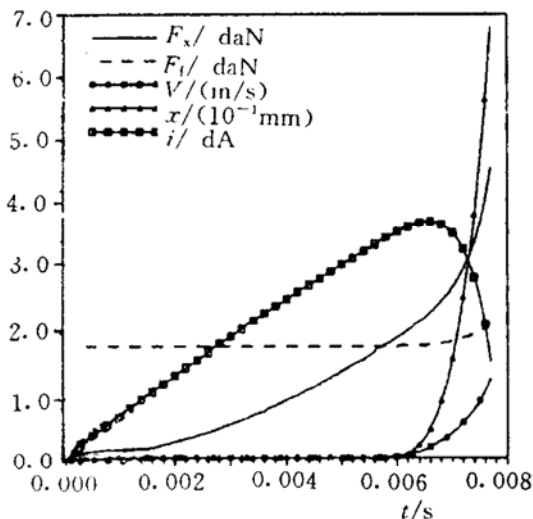


Fig. 3 The calculation results of the dynamic characteristics

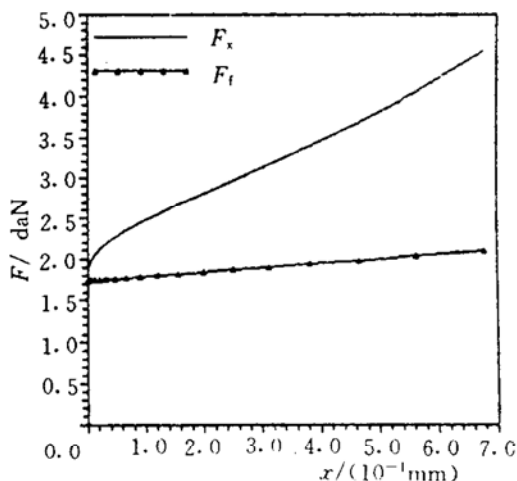


Fig. 4 The curve of attraction and reaction

(2) 速度特性与位移特性:从图3可知,在衔铁运动以前, X 、 V 均为0,运动过程中, X 、 V 总是大于0,可见,衔铁能可靠地吸合到最小气隙处。

(3) 吸、反力特性:图4为对应于图3的吸、反力特性曲线,由图3、图4可知,衔铁动作以前,吸力大于反力,使衔铁获得加速能量,不断加速,最终可靠地吸合,动作时间为 $7.7ms$ 。由图3可知,吸、反力特性曲线的交点即为衔铁开始运动的时刻。

4 反力因素对电动气阀动态特性的影响

4.1 气压的影响

电动气阀用于控制气动液阀的开关,气动液阀用于控制流入高压燃烧室的推进剂流量,而

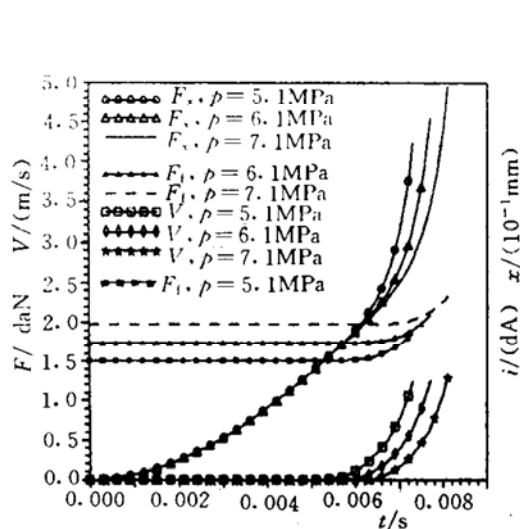


Fig. 5 The velocity curve and the curve of attraction and reaction for the different inlet pressure of the compressed gas p

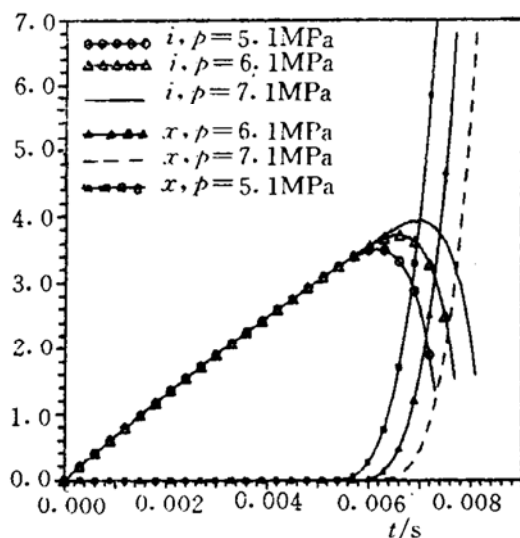


Fig. 6 The curve of electric current and displacement for the different inlet pressure of the compressed gas p

且在启动时燃烧室压力将出现波动, 因此, 要保证电动气阀能可靠而快速的工作, 就需分析气压对电动气阀动态特性的影响。

气压 $p=5.1, 6.1, 7.1$ MPa 时的计算结果如图5和图6所示。图5是速度和吸、反力特性曲线, 在衔铁动作以前, p 不同时, 吸力相等, 但 p 越小, 则 F_t 将越小, F_x 、 F_t 的交点越靠前, 衔铁动作越快。在衔铁运动过程中, p 越小则同一时刻对应的 F_x 越大, 但行程末速度较小。由图5可知, p 越大则 F_t 越大。

图6是不同压力时的 i 、 X 特性曲线, p 越小, 则 t_c 、 t_{cd} 、 i_c 、 i_p 越小, X 越大。经计算, $p=5.1$ MPa, $t_{cd}=7.3$ ms; $p=7.1$ MPa 时, $t_{cd}=8.1$ ms。

4.2 弹簧预紧力的影响

为了使电动气阀在关闭时密封性能好, 应使弹簧有预紧力 F_{t0} , 而电动气阀若要打开就要克服这个反力的作用。图7给出了 F_{t0} 变化时衔铁的速度和吸、反力特性曲线。由图可知, F_{t0} 较大, 则 F_t 较大, F_x 与 F_t 的交点靠后, 衔铁动作较慢, 同一时刻的 F_x 、 V 较小, 但行程末速度几乎相等。

5 结 论

(1) 在第3节设定的已知条件下, 电动气阀从接通电源至衔铁完全闭合所需的时间为7.7ms, 动作安匝储备系数为4.419, 运动过程的峰值电流为0.3708A, 触电流为0.3395A。在衔铁触动之前, 位移、速度均为0, 触动之后, 位移将持续增大, 吸力逐增; 在触动之前, 吸力小于反力; 触动之后, 吸力总是大于反力, 保证了衔铁能可靠地吸到最小气隙处。

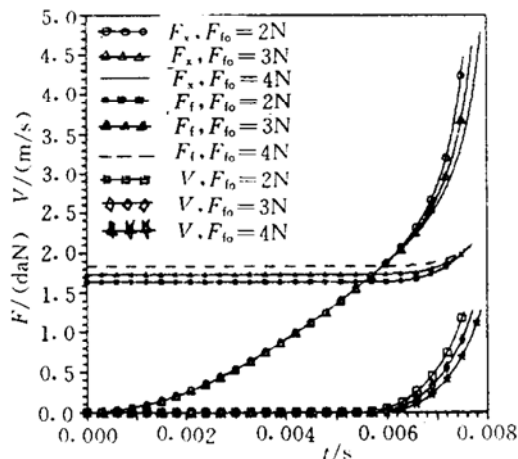


Fig. 7 The velocity curve and the curve of attraction and reaction for the different precompression of the spring F_{t0}

(2) 电动气阀的入口气压是反力因素之一, 气压越大则反力越大, 吸力在衔铁触动之前, 不受入口气压的影响, 衔铁触动时间、吸动时间、触动电流、运动过程中的峰值电流随气压的增大而增大, 衔铁触到之后, 吸力随气压的增大而减小, 运动速度随气压的增大而减小, 且行程末速度将增大, 缩短了电磁铁的机械寿命。可见, 在使气动液阀可靠工作的条件下, 适当减小入口气压有利于提高电动气阀的响应能力, 有利于延长其机械寿命。

弹簧预紧力也是反力因素之一, 此力越大则反力越大。吸力在衔铁触动之前, 不受弹簧预紧力的影响, 衔铁触动时间、吸动时间随弹簧预紧力的增大而增大。触动之后, 吸力随弹簧预紧力的增大而减小, 运动速度随弹簧预紧力的增大而减小但行程末速度略有增大。可见, 在保证电动气阀关闭时可靠密封的条件下, 适当减小弹簧预紧力有利于提高电动气阀的响应能力。

参 考 文 献

- 1 长沙工学院103教研室. 液体火箭发动机电磁阀设计. 长沙:1977
- 2 费鸿俊, 张冠生编. 电磁机构动态分析与计算. 北京:机械工业出版社, 1993

(上接第42页)

参 考 文 献

- 1 雅宁柯 H H. 分数步法. 北京:科学出版社, 1992
- 2 Kovenya V M, Yanenko N N. The splitting method for the numerical solution of problems in gas dynamics. Numerical Methods in Fluid Dynamics, MIR Publishers Moscow, 1984
- 3 Dwoyer D L, Thames F C. Accuracy and stability of time-split finite-difference schemes. AIAA paper 81-1005
- 4 Moretti G. A technique for integrating two-dimensional fluid equation. Comp. & Fluids, 1987, 15(1): 59~75
- 5 余少志, 林峰. 三维流动高效欧拉方程解法——数学形式和物理内涵. 航空科学基金论文集-1, 1992
- 6 Moretti G. A physical approach to the numerical treatment of boundaries in gas dynamics. NASA-CP-2201, 1981