

PWM 高速开关阀动态调节特性仿真研究

尤裕荣, 袁洪滨, 王春民, 罗朝辉
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对某型号发动机燃油调节器的脉宽调制 (PWM) 高速开关阀, 通过建立高速开关阀系统动态数学模型, 开展了高速开关阀调节工作过程动态压力与流量特性的仿真研究。对影响开关阀动态输出特性的相关因素进行了比较分析, 结果表明: 阀座通径、驱动频率与容腔体积等是影响高速开关阀动态性能的主要因素, 并提出相应的改进措施。为改善高速开关阀动态调节特性、提高作动控制系统的控制精度与性能提供参考与借鉴。

关键词: 高速开关阀; 脉宽调制; 动态特性; 仿真

中图分类号: V435.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 05-0024-06

Simulation of dynamic regulating characteristics of PWM high-speed on-off valve

YOU Yu-rong, YUAN Hong-bin, WANG Chun-min, LUO Zhao-hui
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: For the pulse width modulation (PWM) high-speed on-off valve of a certain ramjet regulator, a simulation study on the system dynamic characteristics of pressure and flow rate during regulation of high-speed on-off valve was carried out by establishing a dynamic mathematical model of high-speed on-off valve system. The factors that influence the valve dynamic output characteristic were analyzed. The results indicate valve seat diameter, driving frequency and volume of control cavity are the main reasons that influence valve performance. The methods to improve the dynamic performance were provided. A reference is also provided for improving control system accuracy and performance in this paper.

Keywords: high-speed on-off valve; pulse width modulation; dynamic characteristic; simulation

0 引言

目前, 在航空发动机燃油流量控制系统中,

燃油调节器上的电液转换装置基本上是采用电液伺服阀, 以此来实现对调节器的输出流量进行控制。电液伺服阀虽然惯性小、响应快, 但对燃油清洁度要求高, 容易发生卡死失效等故障问题,

收稿日期: 2011-08-31; 修回日期: 2011-12-06

基金项目: 总装备部预研项目(2007AA705303)

作者简介: 尤裕荣 (1978—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计与仿真

可靠性较低。相对电液伺服阀而言, 脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 高速开关阀则是机械-电子-液压相结合的统一体, 它直接将开关电信号通过机械装置转换成液压模拟信号, 是电-液信号转换的桥梁。它不需要进行 D/A 转换, 可直接与计算机接口, 使得电子控制系统的硬件及软件大大简化。由于它具有响应速度快、结构简单、抗污染和抗干扰能力强且动作稳定可靠、体积小、功耗小和价格低廉等优点, 因此在航空发动机控制系统中, PWM 高速开关阀的应用日趋广泛。

某型号冲压发动机燃油调节控制系统中, 燃油调节器采用高速开关阀作为驱动机构, 对燃油调节器的输出流量进行调节、控制。该高速开关阀是燃油调节器上的核心部件, 它的性能指标和工作可靠性对整个燃油调节器有很大影响, 在高速开关阀调节工作过程中, 控制腔内的动态压力变化是影响调节器流量输出控制精度的关键因素, 因此, 有必要对高速开关阀调节工作过程中, 控制腔动态压力与输出流量特性进行仿真研究, 为改进、提高燃油调节器的调节控制性能提供参考。

1 高速开关阀工作原理

PWM 高速开关阀调节系统原理与开关阀结构示意如图 1 所示, 通过控制高速开关阀的占空比来改变其流量的输出, 从而改变控制腔压力, 以实现执行机构运动位置的控制。开关阀主要由阀体组件、线圈、衔铁、弹簧、阀座等组成, 其工作原理为: 当线圈通电时, 阀体 (挡铁) 和衔铁 (阀芯) 之间产生电磁吸力, 衔铁在电磁吸力作用下, 克服弹簧力、摩擦力, 将阀座通道打开; 当线圈断电后, 电磁吸力消失, 衔铁在弹簧力的作用下克服剩磁吸力及摩擦阻力回到阀座上, 关闭阀座通道。

为了提高高速开关阀的性能, 降低功率损耗、提高可靠性, 高速开关阀采用了图 2 所示的驱动方式。在开关阀的启动阶段, 采用大电流启动方式, 待阀打开后, 再采用低电流方式维持打

开状态。这样一方面可以缩短开关阀的关闭响应时间; 另一方面可以大幅度降低线圈功率损耗, 降低开关阀的温升, 避免过热, 进一步提高开关阀的可靠性能。

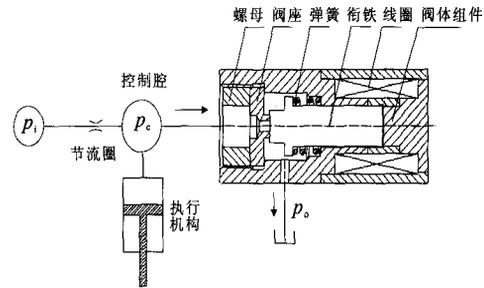


图 1 PWM 高速开关阀原理及系统组成示意图
Fig. 1 Principle of PWM high-speed on-off valve and its composition

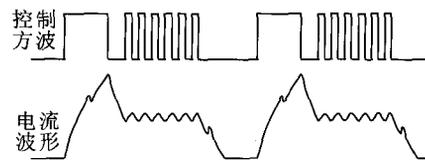


图 2 PWM 高速开关阀驱动方式示意图
Fig. 2 Drive mode of PWM high-speed on-off valve

2 高速开关阀系统建模仿真

为了研究高速开关阀主要相关参数对系统控制腔压力、及其输出流量特性的影响, 因此忽略执行机构活塞运动带来的容腔体积变化造成的影响, 只考虑固定容腔情况下, 对高速开关阀脉冲工作过程中, 控制腔动态压力与输出流量特性进行建模仿真, 研究高速开关阀调节工作过程中, 控制腔内的动态压力与输出流量变化情况。

2.1 数学模型

2.1.1 电磁路数学模型

1) 电路方程

$$U = IR_d + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

式中: U , I 和 R_d 分别为线圈两端电压、电流和电阻; L 为线圈电感。

2) 磁路方程

$$NI = \Phi(R_x + R_f + R_m) \quad (2)$$

式中: Φ 为线圈磁通量; N 为线圈匝数; R_x , R_f 和 R_m 分别为工作气隙磁阻、非工作磁路磁阻和导磁体磁阻。

3) 电磁吸力方程

电磁吸力采用麦克斯韦吸力计算公式

$$F_x = \frac{B_0^2 A_x}{2\mu_0} \quad (3)$$

式中: B_0 为磁感应强度; A_x 为衔铁有效磁通面积; μ_0 为磁导率。

2.1.2 液路数学模型

1) 控制腔入口流量方程

若入口压力为 p_i , 控制腔压力为 p_c , 可得入口孔板流量方程为

$$q_{m1} = C_d A_1 \sqrt{2\rho(p_i - p_c)} \quad (4)$$

式中: C_d 为流量系数; A_1 为入口孔板流通面积; ρ 为流体介质密度。

2) 控制腔出口流量方程

控制腔的出口流量由 PWM 高速开关阀进行调节控制, 其流量方程为

$$q_{m2} = C_d A(x) \sqrt{2\rho(p_c - p_o)} \quad (5)$$

式中: $A(x)$ 为开关阀流通面积; p_o 为开关阀出口压

力。

3) 控制腔压力方程

由流量连续方程, 可得控制腔的动态压力方程为

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{c^2}{V_c} (q_{m1} - q_{m2}) \quad (6)$$

式中: c 为流体中的声速; V_c 为控制腔体积。

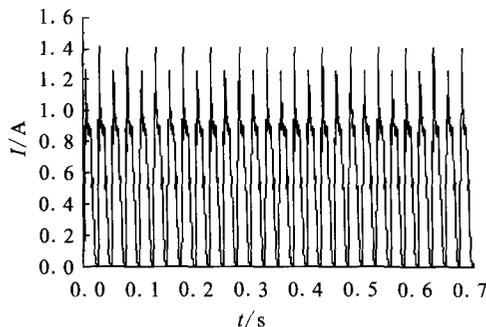
2.1.3 衔铁运动方程

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C_z \frac{dx}{dt} + Kx + F = 0 \quad (7)$$

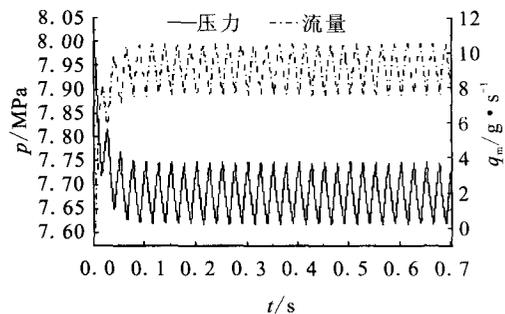
式中: M 为衔铁质量; C_z 为阻尼系数; K 为弹簧刚度; F 为作用于衔铁上的综合作用力。

2.2 特性仿真

基于以上所建立的 PWM 高速开关阀系统数学模型, 对开关阀工作过程的动态特性进行仿真, 其中控制腔入口压力取 8 MPa, 开关阀出口背压取 7.2 MPa, 控制腔体积取 1.5 L, 开关阀工作频率为 40 Hz, 占空比取 50%。仿真得到的高速开关阀线圈电流曲线与动态压力、流量特性变化趋势如图 3 所示。从仿真结果可以看出, 高速开关阀在调节工作过程中, 控制腔压力与流量变化规律呈规则的三角形波变化趋势, 变化频率同样为 40 Hz, 其中压力波动幅度约为 ± 0.06 MPa, 流量波动幅度约为 ± 1.55 g/s。



(a) 电流曲线

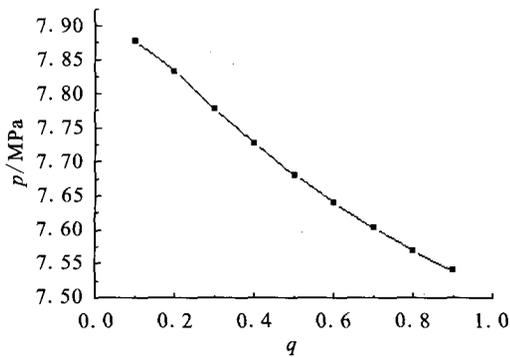


(b) 特性曲线

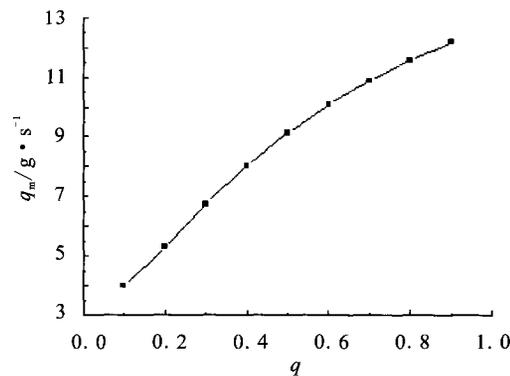
图 3 PWM 高速开关阀动态特性仿真结果特性

Fig. 3 Simulation results of dynamic characteristics of PWM high-speed on-off valve

在此, 分别对占空比在 10%~90% 范围内变化情况下, 对应的高速开关阀输出特性进行计算分析, 得到的平均压力与平均流量跟占空比变化特性如图 4 所示。平均压力随着占空比的增大而降低, 而平均流量随着占空比的增大而增大, 且两者与占空比呈近似的线性变化关系。



(a) 平均压力特性



(b) 平均流量特性

图 4 PWM 高速开关阀占空比变化输出特性

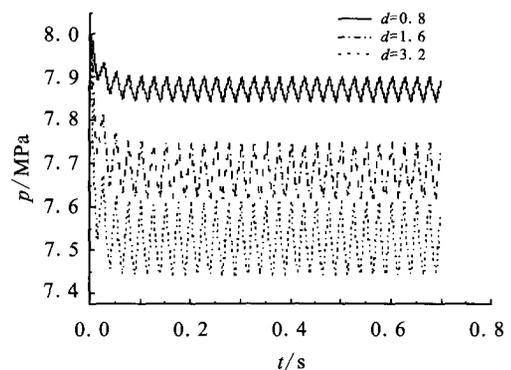
Fig. 4 PWM high-speed on-off valve output characteristic with duty cycle

3 影响动态特性因素分析

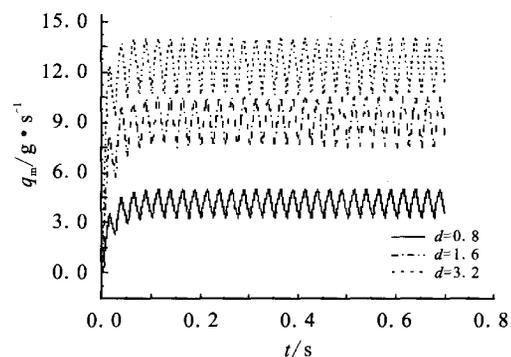
3.1 阀座通径的影响

在衔铁行程固定不变的情况下, 阀座通径的变化反映开关阀流通面积的变化, 它是影响高速开关阀动态输出特性的一个主要因素。在其它条件不变的情况下, 分别对阀座通径为 0.8 mm, 1.6 mm 和 3.2 mm, 占空比为 50% 工况下的高速开关阀的动态压力与流量特性进行对比仿真, 结果如图 5 所示。从中可以看出: 随着阀座通径的

增大, 控制腔平均压力随之减小, 平均流量逐渐增大; 阀座直径越大, 其压力与流量波动幅度也越大; 0.8 mm 阀座通径状态所对应的压力与流量波动幅度分别为 ± 0.03 MPa 与 ± 0.86 g/s, 而 3.2 mm 阀座通径状态对应的压力与流量波动幅度分别为 ± 0.08 MPa 与 ± 1.66 g/s。由此可见, 阀座通径对高速开关阀动态压力与流量特性影响较大, 阀座通径小, 其输出压力与流量越平稳, 更有利于提高作动机构的控制精度。



(a) 压力特性



(b) 流量特性

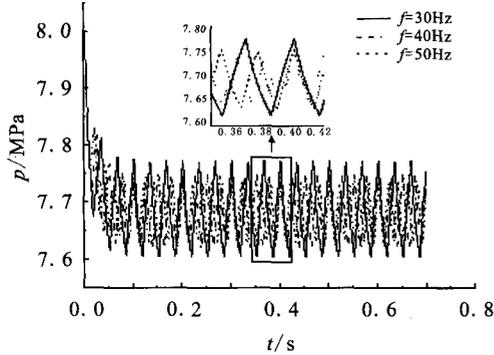
图 5 阀座通径对开关阀输出特性的影响

Fig. 5 Influence of valve seat diameter on valve output characteristics

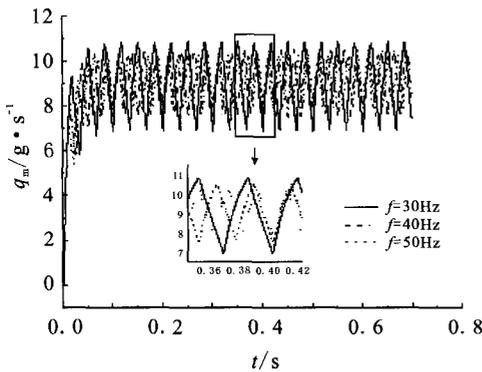
3.2 驱动频率的影响

在占空比 50% 固定不变的情况下, 对驱动频率分别为 30 Hz, 40 Hz 和 50 Hz 的工况进行仿真, 其结果如图 6 所示。从图中曲线的比较分析可知, 随着驱动频率的增大, 压力与流量波动幅度随之降低, 且平均值都保持不变。这一点不难理解, 开关阀工作频率越高, 则其输出参数调制越精细。所以, 提高高速开关阀的工作频率, 有

利于改善开关阀的输出特性，但驱动频率的提高受到开关阀启闭响应时间的限制，若频率过高，则对应的占空比调节范围越窄，不利于作动控制系统的快速、灵敏调节。因此，要综合系统权衡考虑。



(a) 压力特性



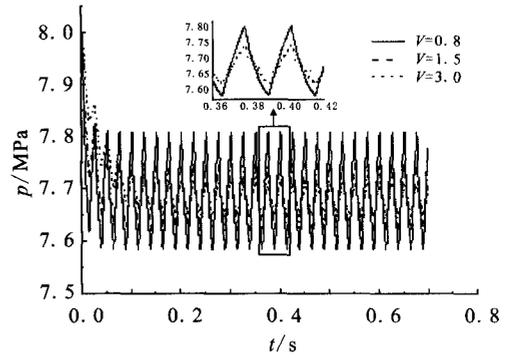
(b) 流量特性

图6 工作频率对开关阀输出特性的影响

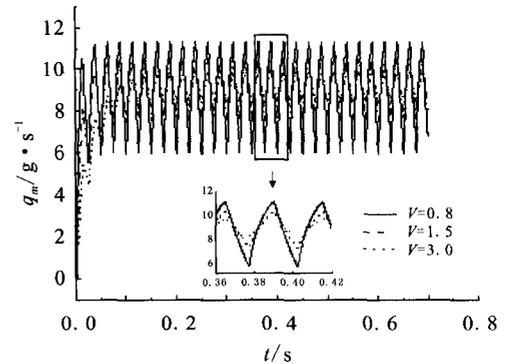
Fig. 6 Influence of working frequency on on-off valve output characteristics

3.3 容腔体积的影响

控制容腔体积也是影响高速开关阀动态压力与流量特性主要因素之一，对容腔体积分别为0.8 L, 1.5 L与3.0 L, 50%占空比驱动状态条件仿真得到的结果如图7所示。从仿真结果可以看出，压力与流量变化趋势基本上保持一致，平均值也维持不变，但随着容腔体积增大，对应的压力与流量波动幅度随之减小。因此，在结构空间限制条件下，尽可能增大控制腔体积，有利于提高高速开关阀的控制性能特性。



(a) 压力特性



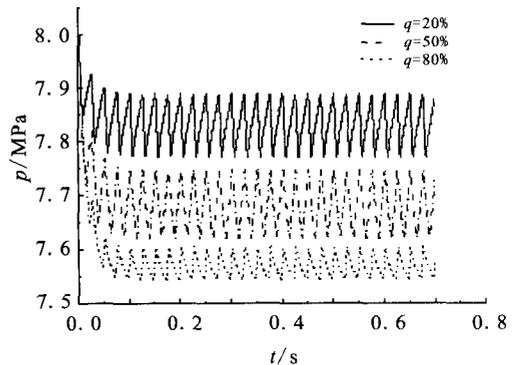
(b) 流量特性

图7 容腔体积对开关阀输出特性的影响

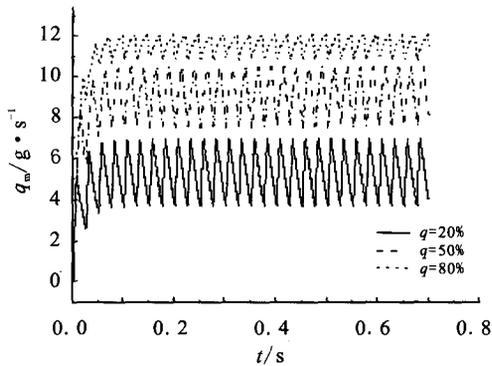
Fig. 7 Influence of control cavity volume on valve output characteristics

3.4 占空比的影响

占空比对高速开关阀的动态压力与流量特性影响也较大，在其它条件不变的情况下，对占空比分别为20%，50%与80%进行仿真比较，结果如图8所示。



(a) 压力特性



(b) 流量特性

图8 占空比对开关阀输出特性的影响

Fig. 8 Influence of duty cycle on valve output characteristics

占空比增大,平均流量随之增大,而平均压力随之减小,且压力与流量波形随着占空比的变化而发生变化。其中,80%的占空比驱动下,压力与流量波动幅度约为 ± 0.03 MPa与 0.58 g/s,而占空比为20%和50%工况下,两者压力与流量波动幅度相当,都约为 ± 0.06 MPa与 1.55 g/s。

4 结论

在建立PWM高速开关阀应用系统仿真数学模型基础上,开展了PWM高速开关阀调节工作过程的动态压力与流量特性仿真研究,对影响开关阀动态输出特性的因素进行了比较分析,得出主要结论如下:

1) 阀座通径对高速开关阀动态压力与流量特性影响较大,阀座通径小,其输出压力与流量越平稳,更有利于提高作动机构的控制精度。

2) 在满足作动控制系统的快速调节需求的

情况下,适当提高高速开关阀的工作频率,有利于改善开关阀的输出特性,从而进一步提高作动机构的控制精度。

3) 增大控制腔体积,有利于改善高速开关阀输出特性与控制性能。

4) 占空比越大,压力与流量波动幅度越小,而占空比越小,压力与流量波动幅度减小并不明显。

参考文献:

- [1] 李瑜. 高速电磁阀在航空发动机数控系统中的应用探索 [C]// 中国航空学会第十三届发动机自动控制学术交流会议论文集. 贵阳: 中国宇航学会, 2006: 32-37.
- [2] 黄维纲, 王旭永. 高速电磁开关阀开关特性的机理研究 [J]. 上海交通大学学报, 1998, 32 (12): 38-41.
- [3] 向忠, 陶国良, 谢建蔚, 等. 气动高速开关阀动态压力特性仿真与试验研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2008, 42(5): 845-849.
- [4] 尤裕荣, 赵双龙, 吴宝元, 等. 基于AMESim的冲压发动机燃油调节器动态特性仿真 [J]. 火箭推进, 2010, 36(4): 12-15.
- [5] 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.
- [6] 赵四海, 吕兴军. 磁流变脉宽调制(PWM)流量控制的研究 [J]. 液压与气动, 2005 (1): 57-58.
- [7] 苏岭, 柳泉冰. 脉宽调制保持电磁阀驱动参数的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 689-692.
- [8] 刘建成, 王立德. 基于DSP的柴油机喷油电磁阀驱动电路的设计 [J]. 内燃机, 2007 (1): 14-17.
- [9] 干练, 庞博. 基于高速开关阀的数字式燃气压力控制装置研究 [J]. 战术导弹控制技, 2009, 26(4): 35-39.

(编辑: 王建喜)