

# 某型弹用冲压发动机巡航段供油振荡的数值仿真\*

杨锡武, 何保成, 任凤升, 王斌元, 刘瑞杰

(航天科工集团公司 31所, 北京 100074)

**摘 要:** 为了研究某型弹用冲压发动机燃油控制系统在巡航段仿真试验中的供油振荡现象, 利用 AMESim 综合性仿真平台建立了整个燃油控制系统的模型, 并进行了数值仿真。仿真结果表明: 在主阀阻尼特性给定的情况下, 通过匹配脉宽调制电磁阀和控制腔前液压节流孔的流量特性, 并同时调整 PID 调节器参数, 就能够有效抑制仿真试验中巡航段的供油振荡。结论可以满足工程分析需要。

**关键词:** 冲压发动机; 燃油控制系统; 振荡; 数值仿真

中图分类号: V233.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 02-0158-04

## Numerical simulation for ram jet cruising stage fuel-supplied oscillation

YANG Xi-wu HE Bao-cheng REN Feng-sheng WANG Bin-yuan LIU Rui-jie

(The 31st Research Inst. of CASIC, Beijing 100074 China)

**Abstract** To investigate the phenomenon about fuel-supplied oscillation of ram jet cruising stage in simulation experiment fuel control system was fully modeled with AMESim and numerical simulation was carried out. The results show that fuel-supplied oscillation can be effectively avoided by matching flow characteristics of PWM electromagnetic valve with hydraulic orifice in front of control chamber and adjusting PID parameters when main valve damp ratio is given. Engineering analysis can be satisfied with this conclusion.

**Key words** Ram jet engine; Fuel control system; Oscillation; Numerical simulation

### 1 引 言

飞航导弹武器系统的研制是在仿真试验、飞行试验及其它试验支持下的对整个系统的综合性研究和开发<sup>[1]</sup>。

随着仿真技术的发展, 其在整个飞航导弹武器系统开发周期中的作用也愈来愈明显。某型冲压发动机燃油控制系统在巡航段的仿真试验中, 出现供油振荡, 并造成巡航马赫数波动的现象。本文利用法国 IMAGNE(伊梦境)公司开发的 AMESim 商用软件, 完整地建立了整个燃油控制系统的模型。通过对该系统的数值仿真, 分析出造成供油振荡的原因, 并利用仿真进行了验证。

### 2 AMESim 综合性仿真平台

AMESim 由法国 IMAGNE(伊梦境)公司开发,

全称为 Advanced Modeling Environment for Performing Simulations of Engineering Systems(高级工程系统仿真建模环境), 迄今已发展到 4.2 版本。

该软件具有友好的建模操作环境: 具有标准化、规范化和图形化的二次开发平台 AMESet 具有适合各个层次用户使用的多种建模方式: 数学方程级 (AMESet)、方块图级、基本元素级和元件级 (如 HCD); 具有动态仿真、稳态仿真、间断仿真、连续仿真, 更兼有多参数批处理仿真运行模式; 具有多种线性化分析工具、模态分析工具、频谱分析工具以及模型简化工具; 具有与当前流行软件 (Matlab& Simulink, Adams) 连接的接口; 而且, 该软件突破性地实现了多学科领域 (机械、液压、气动、热、电和磁等) 的建模和仿真, 使工程技术人员可以从繁琐的数学建模中解放出来, 从而专注于物理系统本身的设计和优化。

\* 收稿日期: 2005-06-24 修订日期: 2005-10-12

作者简介: 杨锡武 (1981-), 男, 硕士生, 研究领域为冲压发动机燃油控制系统的设计与仿真。

### 3 建模与仿真

#### 3.1 燃油控制系统的组成、功能与工作原理

某型冲压发动机的燃油控制系统包括传感器、电子控制器、燃油调节器、涡轮泵四大部件,此燃油控制系统是按导弹的不同飞行条件、不同工作状态,提供不同流量的压力燃油。即要保证发动机在加速爬高、巡航等不同工作阶段下能可靠工作。

对于飞航导弹来说,平飞巡航是冲压发动机的主要工作状态,此时,速度控制可以维持发动机贫油工作,限制推力使之等于阻力。这样,既保证了发动机的工作性能,又充分地利用了燃料贮备,从而有效地发挥发动机的潜力<sup>[2]</sup>。该型燃油控制系统在巡航阶段采用等马赫数控制,燃油调节器主阀利用 PWM 电磁阀进行速度控制。系统方块图如图 1 所示。

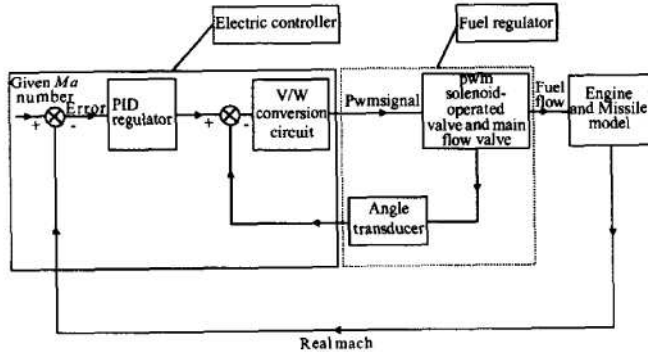


Fig 1 Fuel control system block chart

#### 3.2 冲压发动机-导弹联合体数学模型

根据参考文献 [2],导弹的时间常数(推力对马赫数的影响)长达数十秒至数百秒,而发动机的时间常数(燃油流量对推力的影响)仅为数十毫秒,两者相差很大。这就是说,冲压发动机工作状态的变化不可能对导弹产生迅速的影响;相反,导弹飞行速度的改变就立即使发动机工作状态改变,因此,在发动机-导弹联合体中,发动机的动态过程可以忽略不计。因此,联合体数学模型可以简化为

$$T_w \frac{dMa}{dt} + Ma = K_{q_m} q_{m_f} + f \quad (1)$$

式中  $T_w$  是导弹时间常数,  $q_{m_f}$  是燃油流量,  $K_{q_m}$  是燃油流量到马赫数的传递系数,  $f$  为干扰项和各种未建模动态的综合。实际应用中,利用已有数据进行系统辨识就可以得到由一阶惯性环节表征的发动机-导弹联合体仿真模型。

#### 3.3 基于 AMESim 仿真模型的建立

##### 3.3.1 AMESim 建模步骤

(1) Sketch mode (草图模式): 在这个模式下,首先利用方块图级建模方法建立电子控制器和发动机-导弹联合体模型;再利用元件级建模方法建立计量活门模型;最后,利用 AMESim 的列表编辑器 (Table editor) 建立数字比较器和计数器模型,进而构成 V/W 转换电路模型,并选择脉宽调制电磁阀和连接管路,建立仿真模型如图 2 所示。

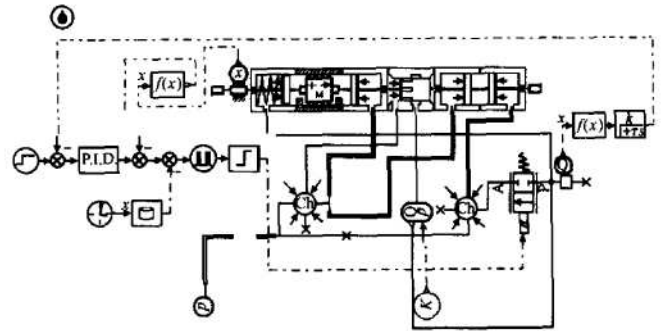


Fig 2 Fuel controlling system model

其中,输入为给定巡航马赫数,两路反馈信号分别是实际飞行马赫数和实际燃油流量。

(2) Submodel mode (子模型模式): 在这个模式下,确定各个部件对应的子模型,通常条件下,我们一般选择 Premier submodel(首选模型)。

(3) Parameter mode (参数模式): 在这个模式下,可以定义各个部件的参数,如 PID 参数、主阀阻尼系数及其放油窗口的大小等;其中,主阀阻尼系数及其放油窗口的大小根据实际系统以及试验数据选取;其中, PID 调节器参数如下定义:  $K_p = 100$   $T_i = 10$   $T_d = 0.001$ ; 给定巡航马赫数为 3。

(4) Run mode (运行模式): 在这个模式下,可以设置运行时间、仿真模式、仿真通讯时间 (Communication interval time) 等仿真参数。根据模型的具体特点,模型仿真时间设为 4s 脉宽调制电磁阀的频率设为 50Hz 仿真通讯时间定为 0.001s 仿真模式选择动态仿真 (Dynamic run)。

(5) 运行仿真: 仿真结果如图 3 图 4 所示。

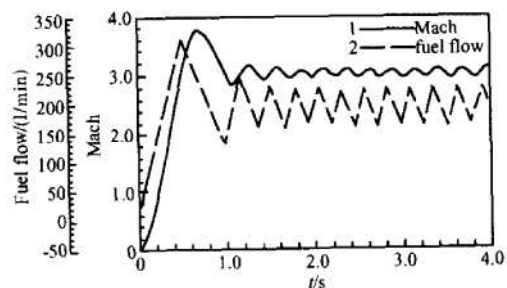


Fig 3 Relationship between Mach and fuel flow

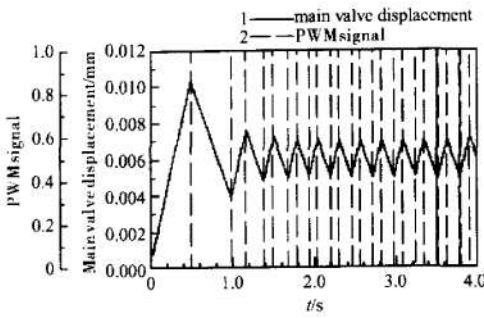


Fig 4 Relationship between main valve displacement and PWM signal

(6) 仿真结果分析: 从图 3 图 4 明显可以看出由于计量活门位移的振荡, 导致了燃油流量的振荡, 造成了飞行马赫数的波动; 此时, 脉宽调制信号的占空比也小于 50%。通过分析可以确定: (a) 主阀阻尼特性; (b) PID 调节器; (c) 脉宽调制电磁阀与控制腔前的液压节流孔的流量特性, 这三个因素如果设置不当都可能造成供油振荡。由于主阀的阻尼特性是由试验确定的, 所以, 抑制供油振荡只能通过调整后两者来完成。

3.3.2 结论的仿真验证

(1) 不改变 PID 调节器参数, 仅改变脉宽调制电磁阀与控制腔前的液压节流孔的流量特性。

利用 AMESim 仿真方式中的 Batch run (批处理方式), 返回到 Parameter mode (参数模式), 将脉宽调制电磁阀与控制腔前的液压节流孔的流量特性按照表 1 设置; 选择 Batch run 方式, 运行仿真。仿真结果图 5 所示。

Table 1 Flow characteristics of PWM solenoid-operated valve and hydraulic orifice ( $Q/(l/m\ in, \Delta p = 1M\ Pa)$ )

Flow characteristics label	No 1	No 2	No 3	No 4
PWM valve	1.2	1.3	1.8	3.8
Hydraulic orifice	0.6	0.75	1	2

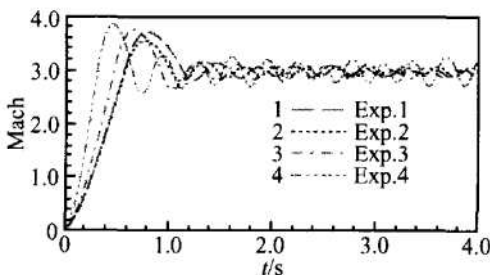


Fig 5 Effect of different flow rate to mach

可见, 脉宽调制电磁阀的流量越大, 系统的加速性越好, 但同时也更容易引起供油振荡和巡航马赫数的波动。

(2) 不改变脉宽调制电磁阀与控制腔前的液压节流孔的流量特性 (取脉宽调制电磁阀与控制腔前的液压节流孔的流量特性列表中的第二组数据, 见表 2), 仅改变 PID 调节器参数。根据工程实际, 巡航段中, 微分调节器作用并不明显, 取给定值 ( $T_d = 0.001$ ) 即可, 因此, 只调节 PI 两个调节器参数。

Table 2 PID parameters adjustment

PI parameter	No 1	No 2	No 3	No 4
$K_p$	100	10	10	10
$T_i$	10	10	100	20

再次运行批处理仿真, 结果如图 6 所示。

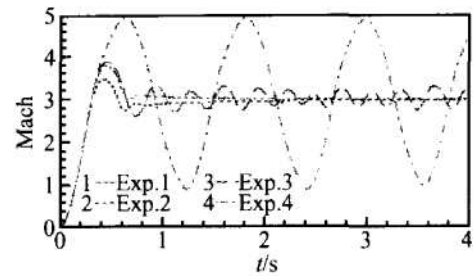


Fig 6 Effect of different PI parameters to Mach

比较图 6 中四次仿真曲线可以确定, 只有比例系数和积分系数的取值处于一定范围内时, 系统的巡航马赫数才可能不发生波动。根据仿真曲线和工程实际, 取  $K_p = 5, T_i = 11, T_d = 0.001$ , 重新进行仿真, 结果见图 7~ 10。

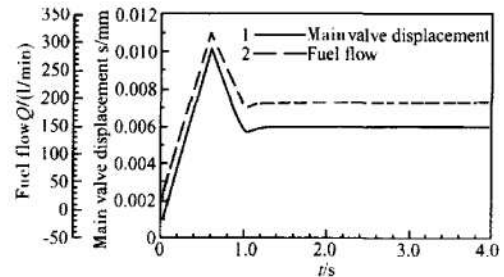


Fig 7 Relationship between main valve displacement and fuel flow

显然, 通过合理匹配脉宽调制电磁阀与控制腔前的液压节流孔的流量特性, 并对 PID 参数进行相应调整, 就可以实现对巡航段供油振荡的抑制; 此时, 脉宽调制信号的占空比为 50%, 计量活门位移保持稳定,

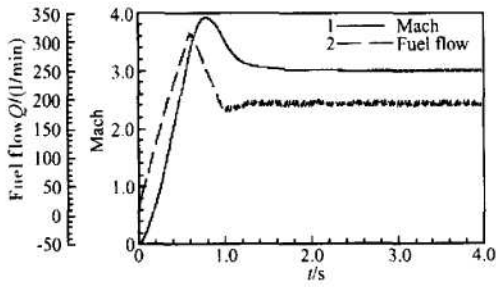


Fig 8 Relationship between Mach and fuel flow

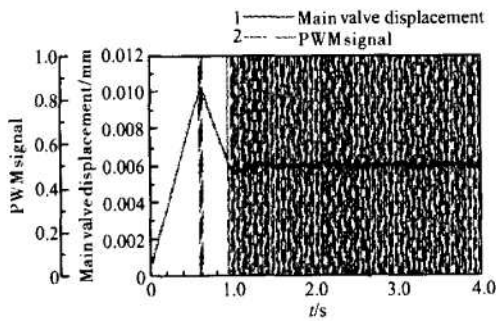


Fig 9 Relationship between main valve displacement and pwm signal

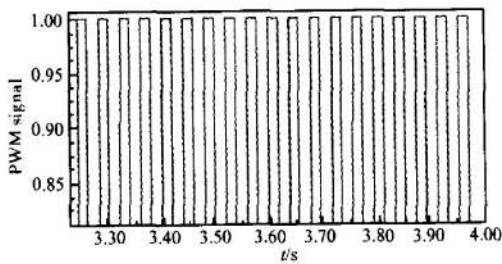


Fig 10 PWM signal at balance point

燃油流量达到要求, 实现了巡航段的等马赫数控制。

## 4 结 论

本文利用 AMESim 建立了具有电液控制特性的某型冲压发动机燃油控制系统的综合仿真模型, 对巡航段供油振荡的原因进行了数值分析, 得到了如下结论:

(1) 脉宽调制电磁阀的流量特性对系统供油量的变化速度有重要影响;

(2) 脉宽调制电磁阀与控制腔前的液压节流孔的流量特性和 PID 参数是一对控制系统供油状态的耦合因素;

(3) 利用 AMESim 强大的多领域建模特性, 建立多学科交叉的物理实体模型是可行的, 其强大的绘图能力以及多样化的仿真方式对于工程分析有着十分重要的意义。

## 参考文献:

- [1] 王东木. 导弹控制系统仿真技术 [J]. 系统仿真学报, 2001, 13(1).
- [2] 刘兴洲. 飞航导弹动力装置 (上) [M]. 北京: 宇航出版社, 1992
- [3] 秦继荣, 沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993
- [4] 蒋 彬, 蔡长青. 液压调速系统的脉宽调制控制 [J]. 液压与气动, 2002, 23(9).
- [5] 马 静, 王镛根. 某导弹燃油调节器的建模及仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2003, 20(9).
- [6] 任凤升, 谢光华. 液体冲压发动机数字电子控制系统 [J]. 推进技术, 2002, 23(1). (REN Feng-sheng XIE Guang-hua Digital electronic control system of a liquid fuel ram jet engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(1).)
- [7] 杨树军, 荆崇波. 脉宽调制数字比例溢流阀研究 [J]. 液压与气动, 2005, 25(3).

(编辑: 张奕春)