

# 液体火箭发动机汽蚀管堵塞仿真研究

唐 虎, 张敏贵, 张金容  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 建立了某泵压式液体火箭发动机系统组件数学模型, 在此基础上进行了发生器氧化剂汽蚀管堵塞的动态仿真计算。仿真计算结果表明: 发动机涡轮转速在堵塞初始快速下降, 之后下降变缓。

**关键词:** 泵压式发动机; 汽蚀管; 堵塞; 动态仿真

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 03-0046-03

## Simulation study on jamming of liquid rocket engine venturi

TANG Hu, ZHANG Min-gui, ZHANG Jin-rong  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Based on a pump-fed liquid rocket engine system, the mathematical models with main components were established. The dynamic simulation for the jamming of generator oxidizer venturi was carried out according to the models. The results indicate that the engine turbine velocity drops down rapidly at initial period of the venturi jamming and then drops slowly.

**Keywords:** pump-fed engine; venturi; jam; dynamic simulation

## 0 引言

在液体火箭发动机研制过程中, 仿真起着重要的作用, 特别是动态仿真, 它通常用于预测发动机主要参数的动态变化, 对不期望出现的变化采取预防措施, 使之向着预期的目标变化。在确定液体火箭发动机起动时序时尤其明显, 因为发动机研制过程中, 很多故障发生在发动机的起动

过程, 发动机起动时工况在很短时间内发生大范围变化, 许多泵压式发动机的涡轮转速在约 1 s 内从 0 上升到额定转速附近, 因此对发动机起动时序控制的精度要求较高, 通常到数十毫秒, 超出范围时容易发生故障。

动态仿真既然可用于预测参数变化, 那么, 在仿真正确的情况下, 也可用于对模式的判别, 当计算的参数变化趋势与实际变化趋势明显不一致时即说明该模式发生的可能性很小。

收稿日期: 2011-09-13; 修回日期: 2012-02-06

基金项目: 国家“863”项目(2008AA7050406)

作者简介: 唐虎(1977—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机系统设计

## 1 发动机系统

发动机系统采用泵压式供应且涡轮与泵同轴的传动布局,见图1。发动机采用燃气发生器循环,火药起动器起动,利用节流圈调节推力室流量,汽蚀管控制发生器流量。

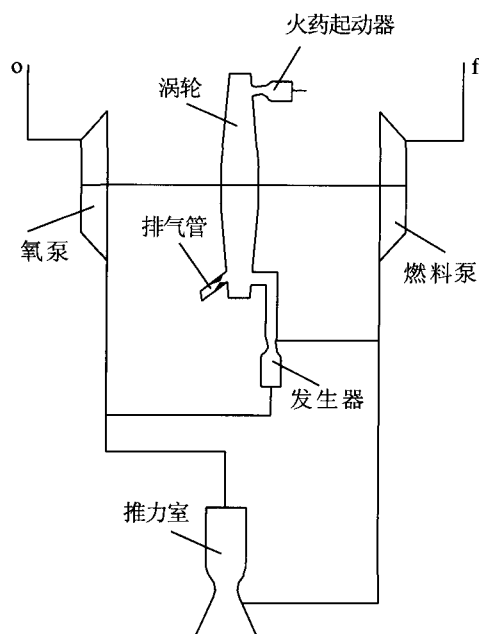


图1 发动机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of engine system

## 2 计算模型

根据发动机系统组成及工作原理建立相关计算模型,主要包括:推进剂输送管路模型、涡轮泵模型和燃烧模型(包括推力室和发生器燃烧模型)。

### 2.1 管路模型

建立管路模型时假设条件为:管路为刚性;推进剂不可压缩,在管道各截面上容积流量相等;推进剂在输送管道内的流动为一维非定常流动,流动参数为管道各截面上的平均值;忽略高度差的影响。

管路包含氧化剂和燃料管路,2种管路模型基本一致,其中氧化剂管路模型见图2所示。

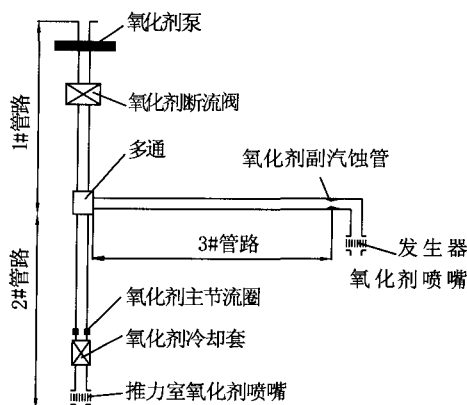


图2 氧化剂管路模型

Fig. 2 Oxidizer pipeline model

对某一段管路,由动态伯努利方程有

$$B \frac{dq}{dt} = p_i - p_e - kq^2 \quad (1)$$

根据流量平衡,对氧化剂管路有

$$\frac{dq_1}{dt} = \frac{dq_2}{dt} + \frac{dq_3}{dt} \quad (2)$$

式(1)和(2)中: $B$ 、 $k$ 为对应管路上的惯性损失系数和流阻损失系数; $q$ 为对应管路上的推进剂流量; $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 分别为氧化剂泵、推力室和发生器氧化剂路流量; $p_i$ 、 $p_e$ 为对应管路计算段入口压力和出口压力。

### 2.2 涡轮泵模型

建立涡轮泵模型时假设发动机工作过程中泵内推进剂全部为液态。对涡轮泵主要方程为

$$\frac{dn_t}{dt} = \left( \frac{30}{\pi} \right)^2 \frac{1}{n_t J} (P_t - P_{po} - P_{pf}) \quad (3)$$

式中: $n_t$ 为涡轮泵转速; $P_t$ 、 $P_{po}$ 、 $P_{pf}$ 分别为涡轮、氧化剂泵和燃料泵功率; $J$ 为涡轮泵转子的转动惯量。

### 2.3 燃烧模型

燃烧模型包括推力室和发生器模型,由于推力室与发生器模型类似,方程也类似,这里就只列出推力室模型。

建立推力室模型时假设条件为:忽略推进剂在推力室的燃烧时滞;推力室燃气的压力、温度及其成分在任一时刻都是均匀的;燃气是理想气体,服从理想气体状态方程。

根据质量守恒原则, 质量平衡方程为

$$\frac{dm_c}{dt} = q_{co} + q_{cf} - q_{ec} \quad (4)$$

根据状态方程, 有

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{m_c}{V_c} \frac{d(RT)_c}{dt} + \frac{(RT)_c}{V_c} \frac{dm_c}{dt} \quad (5)$$

式(4)和(5)中:  $m_c$  为推力室燃气质量;  $q_{co}$ ,  $q_{cf}$ ,  $q_{ec}$  分别为进入推力室的氧化剂、燃料流量和流出推力室的燃气流量;  $p_c$  为燃烧室压力;  $V_c$  为推力室容积;  $(RT)_c$  为推力室燃气热值。

### 3 计算结果及分析

根据前面模型, 采用 MATLAB 语言进行了编程计算。计算中根据发动机调整计算结果赋初始值, 主要参数平衡后, 在某一时刻(计算中为 0.3 s)一多余物堵塞了发生器氧化剂汽蚀管一定流通面积, 堵塞 1.0 s 后多余物被冲走。通过模拟发生器氧化剂汽蚀管堵塞来考察发动机主要参数变化趋势。通过计算, 发生器氧化剂汽蚀管发生堵塞后主要参数变化见图 3 和图 4。

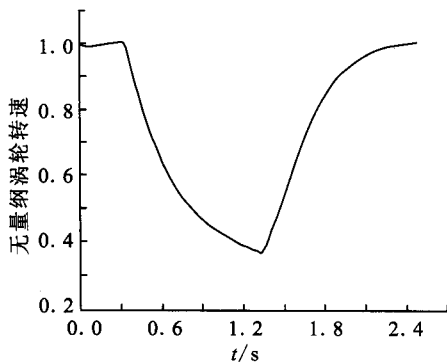


图 3 堵塞中涡轮转速变化

Fig. 3 Curve of turbine rotating speed during jamming

从图 3 和图 4 可以看出, 当发生器氧化剂汽蚀管发生堵塞时, 主要参数均会降低, 但主要的趋势是先降低较快, 后逐渐趋缓。这是因为堵塞开始时, 发生器氧化剂流量迅速降低, 不仅提供涡轮的工质流量降低, 发生器的混合比也迅速降低, 发生器燃气做功能力迅速降低, 从而引起涡轮

输出功率迅速降低, 此时涡轮输出功率与氧化剂和燃料泵消耗的功率差(绝对值)较大, 导致涡轮转速迅速降低, 而后功率差(绝对值)逐渐减小, 涡轮转速降低变缓。当多余物冲走后, 主要参数逐渐恢复, 主要的变化趋势仍是开始较快, 后面趋缓。

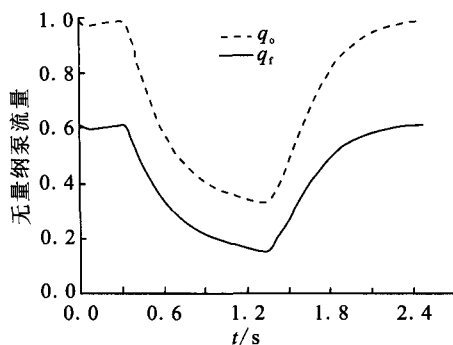


图 4 堵塞中泵流量曲线

Fig. 4 Curves of pump flow rate during jamming

某发动机工作过程中曾出现过参数下降, 见图 5, 经分析认为是由于发生器氧化剂汽蚀管发生了堵塞。对比图 3 和图 5 可以看出, 两者下降趋势基本一致, 即先下降较快, 之后趋缓。由于堵塞程度不一样, 下降程度也不一样。

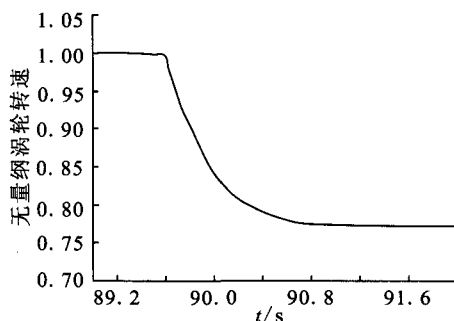


图 5 涡轮转速曲线

Fig. 5 Curve of turbine rotating speed

另一发动机工作过程中也曾出现参数下降现象, 见图 6 (图中以下降初始为 0 s) 所示。

对比图 3 和图 6 可以看出, 发动机工作中涡轮转速下降的趋势与计算的堵塞引起的下降趋势不一致, 说明发动机工作中由于发生器氧化剂汽蚀管堵塞引起涡轮转速降低的可能性很小。

(下转第 58 页)

所用时间缩短。此外,其影响程度又受液滴初始尺寸影响。

3) 气相速度脉动频率对 JP-10 液滴破碎影响不明显。液滴相同初始尺寸,等脉动强度情况下,改变气相速度的脉动频率对液滴破碎时间的影响相比于液滴破碎经历时间可以忽略。

#### 参考文献:

[1] BRUNO T J, HUBER M L. Thermochemical and thermo-

physical properties of JP-10, NIST 6640[R]. USA: NIST, 2006.

[2] O'ROURKE P J, AMSDEN A A, The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup[R]. New York: SAE, 1987.

[3] REITZ R D, DIWAKAR R. Structure of high-pressure fuel sprays[R]. New York: SAE, 1987.

[4] Larimi M, Tiainen J. Diesel spray simulation and KH-RT WAVE model[R]. USA: SAE, 2003.

[5] Anon. Handbook of aviation fuel properties[M]. Alpharetta, GA: CRC, 2004.

(编辑:王建喜)

(上接第 48 页)

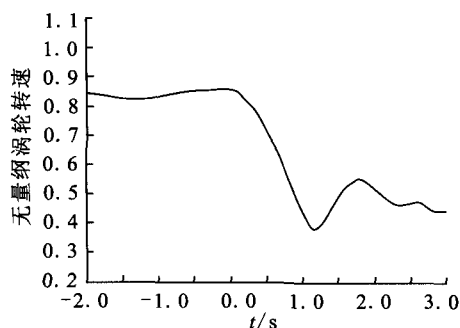


图 6 工作中涡轮转速曲线

Fig. 6 Curve of turbine rotating speed at working

此外,计算中建立模型时做了较多假设,发生器氧化剂汽蚀管在堵塞时将导致混合比非常低,目前对低混合比下发生器的性能未专门进行研究,燃烧效率主要根据以往计算经验确定,因此,计算存在一定的偏差。

## 4 结论

对某发动机系统发动机工作过程中发生器氧化剂汽蚀管堵塞模式进行了仿真计算,从计算结果看,堵塞初始涡轮转速下降较快,之后逐渐变缓。

#### 参考文献:

[1] 刘国球. 火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.

[2] 刘卫国. MATLAB 程序设计与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[3] 周剑平. 精通 Origin7.0[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

[4] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.

[5] 李琪琪, 叶斌, 陈锋, 等. 液体火箭发动机试验频率量信号的处理与仿真[J]. 火箭推进, 2008, 34(5): 39-42.

(编辑: 陈红霞)