

# 落压式供应发生器试验系统动态仿真

马红宇, 段小龙, 刘红军  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 某上面级液氧/煤油补燃发动机的发生器拟采用落压式挤压供应试验系统方案, 为了验证其单独热试方案的可行性, 建立发生器热试系统的动态数学模型, 并进行数值仿真计算, 确认了试验系统方案的可行性, 同时提出了分级起动方式并确定了起动工况。试验取得了成功, 试验结果与仿真吻合, 验证了仿真计算的正确性。

**关键词:** 发生器; 落压式; 热试; 动态; 仿真

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2007) 05-0055-06

## Dynamic simulation for a blow down feed test system of a gas generator

Ma Hongyu, Duan Xiaolong, Liu Hongjun  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To test the gas generator of an upper stage LOX/kerosene staged combustion cycle engine, a blow down feed hot-test system project is designed. The dynamic model is established for the test system. By simulation calculation, It is concluded that the scheme of the test system is feasible and an appropriate start operating condition is selected. The test results show that the simulation calculation is correct.

**Key words:** gas generator; blow down; hot test; dynamic; simulation

### 1 引言

某上面级液氧/煤油补燃发动机研制初期需进行发生器单独热试验, 以验证发生器设计方案的

可行性, 现有试验台不能满足试验要求, 需要进行改造。新试验台要在现有试验设备能力基础上改造完成, 经过对比分析, 初步选定落压式挤压供应系统方案。要确定系统的详细方案和参数要求, 需要考虑以下问题: 由于整个试验过程中,

收稿日期: 2006-10-23; 修回日期: 2007-03-10。

作者简介: 马红宇 (1966—), 女, 高工, 研究领域为液氧/煤油补燃发动机系统设计。

工况随时间逐渐下降,需要评估试验系统能否在规定的试验时间内保证发生器工况要求;发生器建压前,由于贮箱压力很高,而系统流阻如果是按照主级稳定段工况设计,则氧化剂流量很大,极有可能超出氧化剂路涡轮流量计承受能力而造成流量计损坏,如果涡轮流量计破坏后有金属碎片掉入液氧中,将十分危险;如果氧化剂路设置两级,燃料路设置为一级,则有可能点火时发生器混合比偏低,温度过高而烧蚀发生器;发生器点火后能量急剧释放,压力急增,压力峰值有可能超出发生器承受能力,造成产品结构破坏。这些问题直接关系到试验的安全,因此需要定量分析,对发生器点火过程参数变化过程有所了解,并采取必要措施。

通过动态仿真计算,验证了试验方案的可行性,同时确定了合适的初级工况,确定了两种工况氧化剂和燃料路初级流阻要求。试验取得了成功,证明了该仿真计算的正确性。

## 2 试验系统简介

试验系统原理简图如图1所示(不包括吹除和泄出系统)。

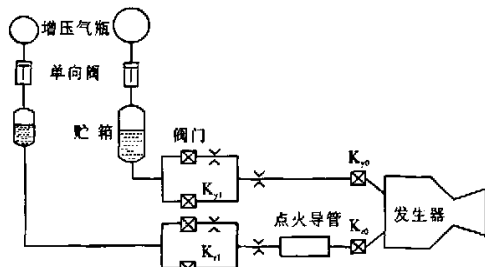


图1 试验系统简图

Fig.1 Schematic of the test system

起动准备过程结束时,氧化剂系统预冷达到要求,氧化剂充填到氧主阀 $ky_0$ 前,燃料充填到点火导管前。然后关闭主级工况阀门 $ky_1$ 、 $kr_1$ 及台上有关的阀门。起动时,打开台上氧化剂和燃料系统阀门,点火导管被挤破,点火剂和燃料挤到燃料主阀前。然后,打开氧化剂主阀,经过一定的时间间隔再打开燃料主阀,发生器点火起

动。并开始进入初级工况,工作一段时间后,打开阀门 $ky_1$ 、 $kr_1$ ,发生器工作转入主级工况。

## 3 动态仿真模型建立

为了简化,仿真计算模型就基于以下假设条件建立集中参数模型:阀门的动作是瞬时的;不考虑液体的压缩性;不考虑发生器的燃烧时滞;发生器燃气为理想气体;不考虑点火剂和煤油的热值差别。

### 3.1 增压系统模型

#### 3.1.1 增压气瓶模型

若 $p_{go} > p_{io} + \Delta p_v$ ,则从气瓶流出增压氧化剂贮箱的氮气流量为:

$$q_{mgo} = \frac{\mu_{go} \cdot A_{go} \cdot p_{go}}{\sqrt{R \cdot T_g}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_{io}}{p_{go}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{io}}{p_{go}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (1)$$

其中当 $\frac{p_{io}}{p_{go}} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时,取 $\frac{p_{io}}{p_{go}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$

若 $p_{go} \leq p_{io} + \Delta p_v$ 时,  $q_{mgo} = 0$ 。

同样可建立燃料系统的增压模型:

$$q_{mgt} = \frac{\mu_{gt} \cdot A_{gt} \cdot p_{gt}}{\sqrt{R \cdot T_g}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_{ft}}{p_{gt}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{ft}}{p_{gt}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2)$$

其中, $p_{go}$ 为氧化剂贮箱增压气瓶内氮气压力; $p_{gt}$ 为燃料贮箱增压气瓶内氮气压力; $T_g$ 为增压氮气的温度; $q_{mgo}$ 为流入氧化剂贮箱的增压氮气流量; $q_{mgt}$ 为流入燃料贮箱的增压氮气流量; $A_{go}$ 为氧化剂贮箱增压路最小截面积; $\mu_{go}$ 为氧化剂贮箱增压路等效流阻系数,根据冷调试验修正; $A_{gt}$ 为燃料箱增压路最小截面积; $\mu_{gt}$ 为燃料箱增压路等效流阻系数,根据冷调试验修正; $R$ 为氮气的气体常数; $k$ 为氮气的绝热指数; $\Delta p_v$ 为增压路单向阀的打开压差。

#### 3.1.2 推进剂贮箱模型

贮箱气垫可认为是带封闭气体的容腔,其压力变化的数学描述如下:

$$\frac{dp_{10}}{dt} = \frac{k-1}{V_{10}} \cdot \left( q_{m_{10}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_{10} - \frac{dV_{10}}{dt} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_{10} \right) \cdot C \quad (3)$$

$$\frac{dV_{10}}{dt} = \frac{q_{m_{10}}}{\rho_o} \quad (4)$$

其中,  $p_{10}$  为氧化剂贮箱内增压气垫压力;  $V_{10}$  为氧化剂贮箱内气垫体积;  $q_{m_{10}}$  为氧化剂流量;  $\rho_o$  为氧化剂的密度;  $C$  为气垫压力的修正系数。实际气液容腔中存在传热传质, 而且过程比较复杂, 为了简化计算, 建立模型时先不考虑物相变化和换热, 最终根据模拟实际工作条件的冷调试验结果修正。

同理可建立燃料贮箱模型。

### 3.2 液路模型

燃料系统:

$$\frac{dq_{mf}}{dt} = \left( p_d + h_f \cdot g \cdot \rho_f \cdot \xi_f \cdot \frac{q_{mf}^2}{\rho_f} - p_{ss} \right) \cdot \frac{1}{R_f} \quad (5)$$

$$R_f = \frac{L_f}{A_f} \quad (6)$$

其中液路流阻系数为:

$$\xi_f = \Delta p_1 \cdot \frac{\rho_f}{\frac{q_{mf1}^2}{2}} \quad (\text{初级工况}) \quad (7)$$

$$\xi_f = \Delta p_2 \cdot \frac{\rho_f}{\frac{q_{mf2}^2}{2}} \quad (\text{主级工况}) \quad (8)$$

其中,  $p_d$  为燃料箱内增压气垫压力;  $h_f$  为燃料箱液柱高度;  $\rho_f$  为燃料密度;  $q_{mf}$  为燃料流量;  $q_{mf1}$  为初级工况时的燃料流量;  $q_{mf2}$  为主级工况时的燃料流量;  $p_{ss}$  为发生器室压;  $\Delta p_1$  为初级工况下从燃料贮箱出口到发生器的压降;  $\Delta p_2$  为主级工况下从燃料贮箱出口到发生器的压降;  $L_f$  为燃料管路的等效长度 (从箱底到发生器入口);  $A_f$  为燃料管路的等效截面积。

氧化剂系统模型与燃料系统类似。

### 3.3 发生器模型

经计算, 发生器到燃气导管的压降很小, 所以在建立仿真模型时, 认为燃气导管内燃气的压力与发生器压力相等, 其简化处理带来的误差通过工艺喷管喉部流量系数修正。为了简化模型,

假设推进剂是瞬时转化的, 不考虑燃烧时滞; 热力组件中燃气的热导率和扩散系数无穷大 (瞬时混合模型); 燃烧产物为理想气体, 符合理想气体状态方程。发生器模型如下:

$$q_{me} = \mu A \frac{p_{ss}}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_o}{p_{ss}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_o}{p_{ss}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (9)$$

$$\text{若 } \frac{p_o}{p_{ss}} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \text{ 取 } \frac{p_o}{p_{ss}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$RT_{in} = f(K) \quad (10)$$

$$K = \frac{q_{mo.in}}{q_{mf.in}} \quad (11)$$

$$m \frac{dRT}{dt} = (kRT_{in} - RT) (q_{mo.in} + q_{mf.in}) - (kRT - RT) q_{me} \quad (12)$$

公式 (12) 写成差分形式为:

$$RT^{(i+1)} = \frac{RT^{(i)} \cdot m^{(i)} + RT_{in} \cdot (q_{mo.in} + q_{mf.in}) \cdot \Delta t}{m^{(i)} + (q_{mo.in} + q_{mf.in}) \cdot \Delta t} \quad (13)$$

$$p_{ss} = \frac{m \cdot RT}{V_{ss}} \quad (14)$$

其中,  $q_{me}$  为排出工艺喷管的燃气流量;  $q_{mo.in}$  为进入发生器的氧化剂流量;  $q_{mf.in}$  为进入发生器的燃料流量;  $K$  为进入发生器的推进剂混合比;  $RT$  为发生器燃气的气体常数与温度的乘积;  $V_{ss}$  为发生器和燃气导管的总容积;  $A$  为工艺喷管的喉部直径;  $\mu$  为工艺喷管的流量系数;  $\Delta t$  为采样时间间隔 (计算步长); 上标 (i) 和 (i+1) 分别表示该时刻和下一时刻的参数。发生器富氧燃气的  $RT$  值是混合比的函数, 通过查表和插值计算得到。

## 4 仿真计算

为简化计算编程, 除了前面所作的假设外, 还作了一些简化处理:

(1) 计算模型中不包括发生器氧化剂和燃料腔充填过程, 由于起动时箱压很高, 充填时间短, 用发生器被充填容腔的容积与起动初始流量的比值代替充填时间, 冷调后进行了修正;

(2) 在主阀打开前流量不为零, 假定其为一

个非常小的值;

(3) 为计算和绘制起动曲线方便, 发生器氧化剂阀打开后、燃料阀打开前发生器的混合比不为无穷大, 而是一个很大的定值;

(4) 经粗略计算, 在初级和主级时从发生器到燃气导管的压降不大且可以通过喉部流量系数修正该误差, 因此, 未建立燃气导管的模型, 而是把它作为发生器腔的一部分;

(5) 燃料系统的流速较低, 未达到紊流, 流阻系数随流量是变化的, 计算时取定初级和主级工况额定流量下的流阻系数分别作为起动与初级、主级下的流阻系数。

采用欧拉法计算。该方法是初值问题数值解法中较简单的一种, 每积分一步的计算量小, 虽然精度不如龙格库塔等计算方法高, 但是能满足本计算需要。为保证收敛, 计算步长取 0.5ms。

## 5 结果分析

仿真计算表明: 如果不设置初级, 则发生器点火后会出现很高的压力、流量峰值, 因此需要设置初级。若初级工况定的较低, 则由初级转主级过程氧化剂流量峰值偏高; 而若初级工况定的较高则起动过程流量峰值较高, 氧化剂流量峰值超过了流量计量程, 虽然持续时间短, 但存在不可靠因素。计算并比较了几组不同初级工况下的起动过程后, 选定了初级工况, 该工况下仿真计算结果见图 2 所示, 整个工作过程组件工况在正常范围内, 起动程序和初级工况设定合理, 试验系统安全。

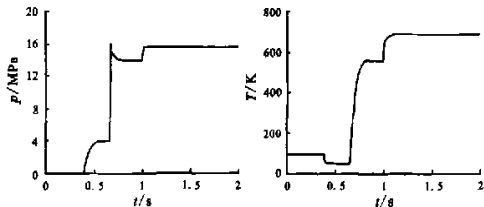


图 2 起动过程仿真结果

Fig.2 Simulation results of startup process

仿真计算表明: 试验时间为 30s 时, 发生器

压力下降 1.5MPa, 混合比在要求的范围内。仍然满足试验任务书的要求, 可以认定该落压式挤压方案是可行的。

热试验结果见图 3。由于试验前出现管路泄漏, 试验准备时间长, 导致氧化剂贮箱初始压力稍低于预计值, 因此实际工况比计算工况略低。

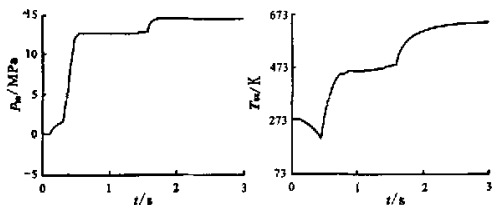


图 3 起动过程试验结果

Fig.3 Test results of startup process

## 6 结论

经过动态仿真计算, 评估了该落压式挤压试验系统方案, 认为系统方案可行, 满足试验任务书的要求。通过计算不同初级工况下的起动过程, 对起动和初级转主级过程的流量和压力峰值比较, 选定了初级工况。

发生器热试获得成功, 仿真计算与试验结果基本吻合, 证明仿真计算给出的评估结论正确, 起动工况参数的选取合理。由于假设条件与实际不同, 一些修正系数的选取不完善, 计算结果与试验结果略有差异。根据热试结果, 可进一步完善模型。本模型和仿真计算方法可供其他挤压系统借鉴。

## 参考文献:

- [1] 刘红军. 补燃循环发动机静态特性与动态响应特性研究[D]. 西北工业大学. 1998.
- [2] 徐浩海, 蔡会让, 马红宇, 等. 补燃循环发动机涡轮泵联试强迫起动程序设计[J]. 火箭推进. 2005, 31(5): 1-5.
- [3] 纵苏. 液氧/煤油燃气发生器的试验研究 [J]. 推进技术, 1994, (4): 58-61.

(编辑: 侯 早)