

双组元液体挤压推进系统启动过程时序分析

戴 佳, 黄敏超, 沈赤兵, 马加庆

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 以四氧化二氮/偏二甲肼 ($N_2O_4/UDMH$) 双组元挤压式推进系统为研究对象, 对该系统的启动过程动态特性进行了分析和研究, 运用单元法建立了整个推进系统启动过程动态数学模型, 采用 MATLAB 软件中的 SIMULINK 工具仿真了推进系统启动过程, 并得到发动机各阀门打开时序变化对系统启动特性影响的规律。

关键词: 推进系统; 启动过程; 动态数学模型; 仿真; 时序

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2006)02-0016-07

Startup process timing analysis of liquid bipropellant pressure-fed propulsion system

Dai Jia, Huang Minchao, Shen Chibing, Ma Jiaqing

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: This paper focused on the investigation on the startup dynamic characteristics of the $N_2O_4/UDMH$ bipropellant pressure-fed propulsion system, by use of the Unit method, the startup dynamic mathematical model of the whole propulsion system is presented, then the propulsion system startup process is simulated by using MATLAB/SIMULINK software, and the law of the effects of valve timing on the startup characteristics is obtained.

Key words: propulsion system; startup process; dynamic model; simulation; timing

符号说明:

P —— 压强, Pa

T —— 温度, K

ζ —— 惯性流阻

h —— 管路高度, m

q —— 质量流量, kg/s

ρ —— 液体密度, kg/m^3

ξ —— 流阻系数

L —— 管路长度, m

收稿日期: 2005-11-18; 修回日期: 2005-12-7。

作者简介: 戴佳 (1983—), 女, 硕士, 研究领域为空间推进系统动态特性分析。

万方数据

a	——	液体中的声速, m/s	R	——	气体常数
K	——	推进剂组元比	r	——	比热比
F	——	管路横截面积, m^2	V	——	容积, m^3
l	——	某时刻管路充填长度, m	v	——	某时刻集液腔充填容积, m^3
g	——	重力加速度	n	——	管路分段数

下标:

o	——	氧化剂	f	——	燃料
1	——	贮箱—主阀管路	2	——	主管路
3	——	分支管路	4	——	充填管路
c	——	燃烧室	t	——	贮箱

1 引言

液体火箭发动机的动态工作过程中, 最关键的是启动过程, 启动的成功与否直接关系到航天运载器的发射成败。在发动机的启动过程中, 推进剂组元发生极为复杂的物理化学变化, 发动机系统参数在大范围内迅速地变化, 很容易使系统组件承受较恶劣的工况, 从而导致发动机故障, 所以启动可靠性在很大程度上决定着整个发动机的可靠性。目前, 人们主要是靠精确控制发动机阀门的开启时序来保证启动过程的安全性和平稳性, 确定启动时序是发动机研制和试验过程中的主要难点与关键技术之一。本文针对某双组元挤压式推进系统, 在建立动态数学模型的基础上, 仿真了该发动机系统的启动过程, 对各阀门打开时间进行了研究, 并分析了阀门时序对发动机各性能参数的影响^[1]。

2 推进系统启动过程

四氧化二氮/偏二甲肼双组元挤压式推进系统启动时, 先打开燃料(偏二甲肼)分阀, 使其先进入推力室。经过某一时间以后再打开氧化剂(四氧化二氮)分阀, 氧化剂进入推力室与燃料混合燃烧(工作时序见图 1)。建立数学模型和计算机仿真分析发动机系统时, 我们假设起始时刻氧化剂和燃料主阀已经打开, 氧化剂和燃料已经充填完主管道。整个系统作如下的假设:

- (1) 推进剂管道中流动为一维流, 且已达到紊流状态;
- (2) 燃烧室中压强分布均匀, 燃气符合理想气体状态方程;
- (3) 空间发动机系统在空间中工作, 可以不考虑系统动态传热。



① DQ0 氧化剂和燃料主阀打开; ②DQ1 燃料分阀打开;
③DQ2 氧化剂分阀打开

图 1 发动机系统工作时序图
Fig.1 Schematic diagram of valve timing

3 推进系统部件模块化

液体火箭发动机的建模与仿真是针对某一具体型号的发动机, 建立数学模型并编制计算机程序(简称为建模), 然后对其进行仿真计算与分析。如果系统的结构形式改变, 则必须重新推导方程, 建立系统数学模型, 全部或部分重新编制计算机程序。然而, 对液体火箭发动机这样复杂的动力学系统, 采用上述方法建模需要极大的工程和软件工作量, 这往往妨碍了利用数学模型和计算机仿真技术对液体火箭发动机进行深入分析和研究。

采用模块化建模与仿真方法,则是先建立起发动机典型元、部件的仿真模型,整个发动机系统的模型仅仅是这些部件模型通过一定手段实现的具有一定规律的组合形式,同种类部件可重复使用同一个模块方程,这样就可以很容易地解决各种不同结构形式的液体火箭发动机的仿真问题^[2,3]。

据此我们把发动机系统划分为如图2所示的下列六个仿真模块:贮箱模块;管路模块;充填模块;燃烧室模块;喷管模块;电磁阀模块。

为了使系统更简单,我们认为贮箱恒压,并将电磁阀作为管路部分的局部流阻处理,这样我们在初步建立仿真模型时重点考虑管路模块、充填模块、燃烧室模块和喷管模块即可。

4 启动过程典型组件动态数学模型

4.1 管路动力学模型

为分析液路的流动特性,必须考虑其许多物理性质:惯性、粘性和压缩性。如果采用集中参数方法来描述这些物理特性,必须满足空间长度与波长相比几何尺寸很小的条件限制,例如管路长度 $L \ll \lambda = a/f_{\max}$, $f_{\max} = \omega_{\max}/2\pi$ 为最大振频。

4.1.1 贮箱-主阀管路动力学模型

氧化剂管路:

$$\frac{\zeta_{o1}}{2n_1} \frac{dq_{o1}}{dt} = p_{oT} - p_{o1} - \frac{\xi_{o1}}{n_1 + 1} \frac{|q_{o1}|q_{o1}}{\rho_o} + \frac{h_{o1}}{2n_1} \rho_o g \quad (1)$$

$$\frac{\zeta_{o1}}{n_1} \frac{dq_{o1}}{dt} = p_{o1} - p_{o1}' - \frac{\xi_{o1}}{n_1 + 1} \frac{|q_{o1}|q_{o1}}{\rho_o} + \frac{h_{o1}}{n_1} \rho_o g \quad (2)$$

$$\frac{V_{o1}}{n_1 a_o^2} \frac{dp_{o1}}{dt} = q_{o1} - q_{o1}' \quad (3)$$

$$\frac{V_{o1}}{n_1 a_o^2} \frac{dp_{o1}}{dt} = q_{o1}' - q_{o2} \quad (4)$$

燃料管路:

$$\frac{\zeta_{f1}}{2n_1} \frac{dq_{f1}}{dt} = p_{fT} - p_{f1} - \frac{\xi_{f1}}{n_1 + 1} \frac{|q_{f1}|q_{f1}}{\rho_f} + \frac{h_{f1}}{2n_1} \rho_f g \quad (5)$$

$$\frac{\zeta_{f1}}{n_1} \frac{dq_{f1}}{dt} = p_{f1} - p_{f1}' - \frac{\xi_{f1}}{n_1 + 1} \frac{|q_{f1}|q_{f1}}{\rho_f} + \frac{h_{f1}}{n_1} \rho_f g \quad (6)$$

$$\frac{V_{f1}}{n_1 a_f^2} \frac{dp_{f1}}{dt} = q_{f1} - q_{f1}' \quad (7)$$

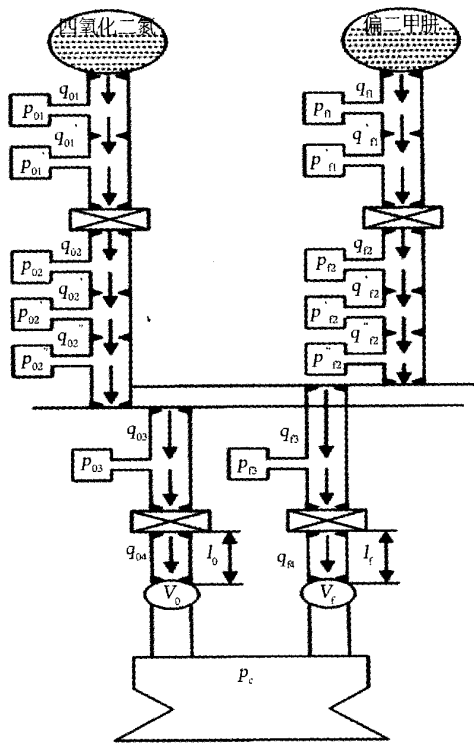


图2 推进系统模块结构图

Fig.2 Schematic diagram of modular propulsion system

$$\frac{V_{f1}}{n_1 a_f^2} \frac{dp_{f1}}{dt} = q_{f1} - q_{f2} \quad (8)$$

式中, n_1 为贮箱-主阀管路分段数目, 文中 $n_1=2$ 。

4.1.2 主阀动力学模型

氧化剂主阀:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\zeta_{o1}}{2n_1} + \frac{\zeta_{o2}}{2n_2} \right) \frac{dq_{o2}}{dt} = p_{o1}' - p_{o2} - \\ & \left(\frac{\xi_{o1}}{n_1 + 1} + \xi_{mvo} + \frac{\xi_{o2}}{n_2 + 1} \right) \frac{|q_{o2}|q_{o2}}{\rho_o} + \left(\frac{h_{o1}}{2n_1} + \frac{h_{o2}}{2n_2} \right) \rho_o g \end{aligned} \quad (9)$$

燃料主阀:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\zeta_{f1}}{2n_1} + \frac{\zeta_{f2}}{2n_2} \right) \frac{dq_{f2}}{dt} = p_{f1}' - p_{f2} - \\ & \left(\frac{\xi_{f1}}{n_1 + 1} + \xi_{mvr} + \frac{\xi_{f2}}{n_2 + 1} \right) \frac{|q_{f2}|q_{f2}}{\rho_f} + \left(\frac{h_{f1}}{2n_1} + \frac{h_{f2}}{2n_2} \right) \rho_f g \end{aligned} \quad (10)$$

式中, n_2 为主管路分段数目, 文中 $n_2=3$ 。

4.1.3 主管路动力学模型

氧化剂管路:

$$\frac{\zeta_{o2}}{n_2} \frac{dq_{o2}}{dt} = p_{o2} - \dot{p}_{o2} - \frac{\zeta_{o2}}{n_2+1} \frac{|q_{o2}|q_{o2}}{\rho_o} + \frac{h_{o2}}{n_2} \rho_o g \quad (11)$$

$$\frac{\zeta_{o2}}{n_2} \frac{dq_{o2}}{dt} = p_{o2} - \dot{p}_{o2} - \frac{\zeta_{o2}}{n_2+1} \frac{|q_{o2}|q_{o2}}{\rho_o} + \frac{h_{o2}}{n_2} \rho_o g \quad (12)$$

$$\frac{V_{o2}}{n_2 a_o^2} \frac{dp_{o2}}{dt} = q_{o2} - q_{o2} \quad (13)$$

$$\frac{V_{o2}}{n_2 a_o^2} \frac{dp_{o2}}{dt} = q_{o2} - q_{o2} \quad (14)$$

$$\frac{V_{o2}}{n_2 a_o^2} \frac{dp_{o2}}{dt} = q_{o2} - q_{o3} \quad (15)$$

燃料管路:

$$\frac{\zeta_{f2}}{n_2} \frac{dq_{f2}}{dt} = p_{f2} - \dot{p}_{f2} - \frac{\zeta_{f2}}{n_2+1} \frac{|q_{f2}|q_{f2}}{\rho_f} + \frac{h_{f2}}{n_2} \rho_f g \quad (16)$$

$$\frac{\zeta_{f2}}{n_2} \frac{dq_{f2}}{dt} = p_{f2} - \dot{p}_{f2} - \frac{\zeta_{f2}}{n_2+1} \frac{|q_{f2}|q_{f2}}{\rho_f} + \frac{h_{f2}}{n_2} \rho_f g \quad (17)$$

$$\frac{V_{f2}}{n_2 a_f^2} \frac{dp_{f2}}{dt} = q_{f2} - q_{f2} \quad (18)$$

$$\frac{V_{f2}}{n_2 a_f^2} \frac{dp_{f2}}{dt} = q_{f2} - q_{f2} \quad (19)$$

$$\frac{V_{f2}}{n_2 a_f^2} \frac{dp_{f2}}{dt} = q_{f2} - q_{f3} \quad (20)$$

4.1.4 分管路动力学模型

氧化剂管路:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\zeta_{o2}}{2n_2} + \frac{\zeta_{o3}}{2n_3} \right) \frac{dq_{o3}}{dt} = p_{o2} - p_{o3} - \\ & \left(\frac{\zeta_{o2}}{n_2+1} + \frac{\zeta_{o3}}{n_3+1} \right) \frac{|q_{o3}|q_{o3}}{\rho_o} + \left(\frac{h_{o2}}{2n_2} + \frac{h_{o3}}{2n_3} \right) \rho_o g \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{V_{o3}}{n_3 a_o^2} \frac{dp_{o3}}{dt} = q_{o3} - q_{o4} \quad (22)$$

燃料管路:

$$\left(\frac{\zeta_{f2}}{2n_2} + \frac{\zeta_{f3}}{2n_3} \right) \frac{dq_{f3}}{dt} = p_{f2} - p_{f3} - \quad (23)$$

$$\left(\frac{\zeta_{f2}}{n_2+1} + \frac{\zeta_{f3}}{n_3+1} \right) \frac{|q_{f3}|q_{f3}}{\rho_f} + \left(\frac{h_{f2}}{2n_2} + \frac{h_{f3}}{2n_3} \right) \rho_f g$$

$$\frac{V_{f3}}{n_3 a_f^2} \frac{dp_{f3}}{dt} = q_{f3} - q_{f4} \quad (24)$$

n_3 为主管路分段数目, 文中 $n_3=1$ 。

4.2 充填动力学模型

氧化剂管路:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\zeta_{o3}}{2n_3} + \int_0^t \frac{dl_o}{F_o} + \frac{V_o}{V_o} \zeta_o \right) \frac{dq_{o4}}{dt} = p_{o3} - p_c - \\ & \left(\frac{\zeta_{o3}}{n_3+1} + \zeta_{vo} + \frac{l_o}{L_o} \zeta_o + \frac{V_o}{V_o} \zeta_o + \zeta_{ho} \right) \frac{|q_{o4}|q_{o4}}{\rho_o} + \left(\frac{l_o}{L_o} h_o + \frac{h_{o3}}{2n_3} \right) \rho_o g \end{aligned} \quad (25)$$

$$\frac{dl_o}{dt} = \frac{q_{o4}}{\rho_o F_o} \quad (26)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{q_{o4}}{\rho_o} \quad (27)$$

燃料管路:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\zeta_{f3}}{2n_3} + \int_0^t \frac{dl_f}{F_f} + \frac{V_f}{V_f} \zeta_f \right) \frac{dq_{f4}}{dt} = p_{f3} - p_c - \\ & \left(\frac{\zeta_{f3}}{n_3+1} + \zeta_{vf} + \frac{l_f}{L_f} \zeta_f + \frac{V_f}{V_f} \zeta_f + \zeta_{hf} \right) \frac{|q_{f4}|q_{f4}}{\rho_f} + \left(\frac{l_f}{L_f} h_f + \frac{h_{f3}}{2n_3} \right) \rho_f g \end{aligned} \quad (28)$$

$$\frac{dl_f}{dt} = \frac{q_{f4}}{\rho_f F_f} \quad (29)$$

$$\frac{dv_f}{dt} = \frac{q_{f4}}{\rho_f} \quad (30)$$

式中, L_o 、 L_f 分别为氧化剂、燃料充填管路总充填长度; V_o 、 V_f 分别为氧化剂、燃料集液腔总容积; ζ_o 、 ζ_f 分别为氧化剂、燃料集液腔惯性流阻; ζ_{vo} 、 ζ_{vf} 分别为氧化剂、燃料分阀局部流阻系数; ζ_o 、 ζ_f 分别为氧化剂、燃料集液腔局部流阻系数;

ξ_o 、 ξ_r 分别为氧化剂、燃料充填管路沿程流阻系数； ξ_{ho} 、 ξ_{hf} 分别为氧化剂、燃料喷注器局部流阻系数。

4.3 燃烧室动力学模型

$$\frac{dK_c}{dt} = (K_c + 1)(q_{o4} - K_c q_{f4}) \frac{R_c T_c}{p_c V_c} \quad (31)$$

$$\frac{dp_c}{dt} = \left[\frac{T}{T_c} q - q_n \right] \frac{r R_c T_c}{V_c} \quad (32)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = [(rT - T_c)q - T_c(r-1)q_n] \frac{R_c T_c}{p_c V_c} \quad (33)$$

$$q = q_{o4} + q_{f4} \quad (34)$$

q_n 为喷管出口燃气流量； R 、 r 、 T 由热力计算确定。

4.4 喷管动力学模型

$$\frac{p_a}{p_c} \leq \left(\frac{2}{r+1} \right)^{\frac{r}{r-1}}, q_n = \frac{p_c A_t}{\sqrt{R_c T_c}} \sqrt{r \left(\frac{2}{r+1} \right)^{\frac{r+1}{r-1}}} \quad (35)$$

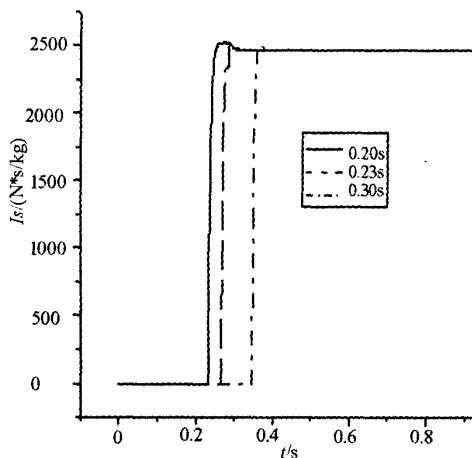
$$\frac{p_a}{p_c} > \left(\frac{2}{r+1} \right)^{\frac{r}{r-1}}, q_n = \frac{p_c A_t}{\sqrt{R_c T_c}} \sqrt{\frac{2r}{r-1} \left[\left(\frac{p_a}{p_c} \right)^{\frac{2}{r}} - \left(\frac{p_a}{p_c} \right)^{\frac{r+1}{r}} \right]} \quad (36)$$

p_a 为环境压力； A_t 为喷管喉部面积。

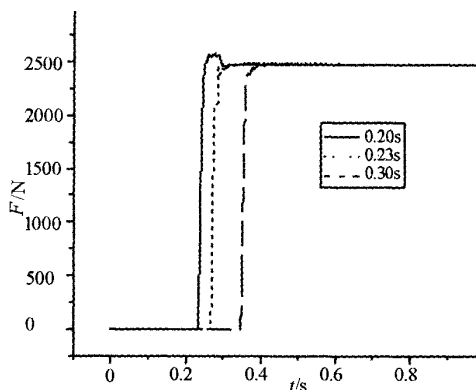
5 仿真计算与结果分析

如图 1 所示，DQ1、DQ2 的工作时序反映的是燃料分阀和氧化剂分阀打开时间，以燃料分阀打开时间（0.20s）为基准时间，氧化剂分阀打开时间（ t_c ）分别取 0.20s、0.23s、0.30s，运用 MATLAB/SIMULINK 软件编程求解，最大仿真时间取 1s，采用变步长 ODE45 求解器，其分类仿真结果如下图 3 所示。

从图 3 中可以看出，提前打开氧化剂分阀，使推力、比冲、燃烧室压力、温度以及混合比等参数均出现振荡，燃烧室压力振荡引起发动机其它参数也发生波动；推迟打开氧化剂分阀，使推力、比冲、燃烧室压力、温度以及混合比等参数的上升曲线有所延迟，相应地延迟了它们达到稳态值的时间。喷管的出口流量、燃烧室入口燃料流量以及燃烧室入口氧化剂流量开始均出现振荡，提前打开氧化剂分阀，燃料流量曲线超调量减小；推迟打开氧化剂分阀，对喷管出口流量及燃烧室入口氧化剂流量影响较小，只是使上升曲线延迟，燃料流量曲线则出现先“凸峰”后平台的现象。推迟氧化剂分阀打开时间，氧化剂充填管长、氧化剂集液腔充填体积等参数的响应时间也会相应的延迟，这主要是因为系统没有设置流量调节器，氧化剂进入管道时间完全依赖于阀门打开时间。



(a) Effect of t_c on I_s - t



(b) Effect of t_c on F - t

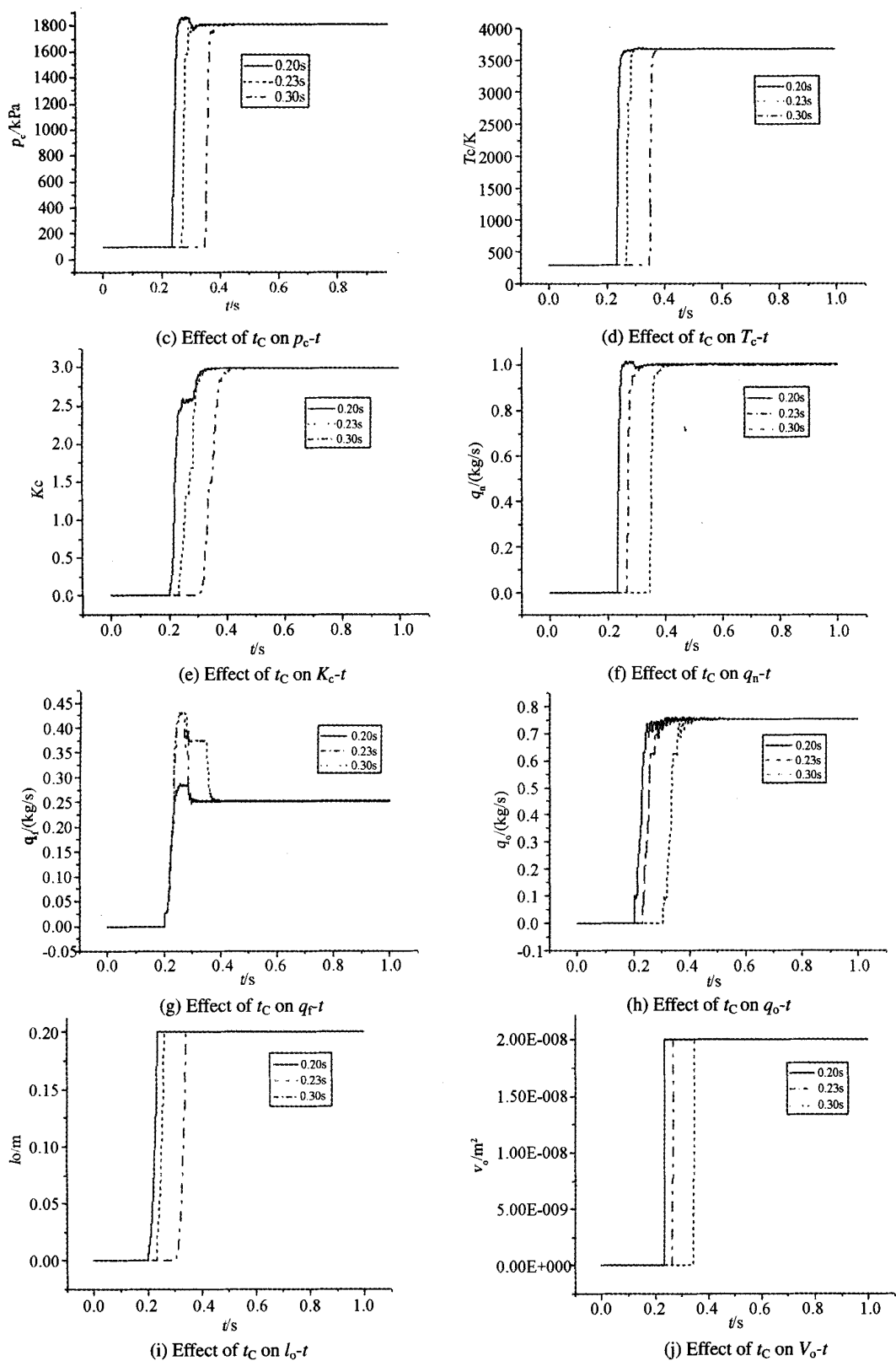


图3 阀门打开时间对发动机各性能参数的影响
Fig.3 The effect of valve timing on performance parameters

6 结束语

对某 $N_2O_4/UDMH$ 双组元挤压式推进系统, 在建立发动机动态数学模型的基础上, 对其启动过程进行了仿真研究, 得到了阀门打开时序对发动机启动特性的影响规律。仿真结果在一定程度上反映了该推进系统启动过程的动态特性, 本文所做的工作是进行双组元挤压式推进系统动态特性深入研究的基础, 在此基础上可以深入研究推进系统的流量特性、充填特性和水击特性, 同时可以对推进系统进行稳定性分析; 分析结果表明, 本文所提出的仿真计算方法是可行的, 所得到的

计算结果对于该类发动机的设计具有参考意义。

参考文献:

- [1] 刘红军等. 补燃循环发动机启动特性仿真研究[J]. 推进技术, 1999,6.
- [2] 王新建, 王楠. DaFY111-1a 发动机发生器-涡轮泵联试启动过程仿真研究[D]. 国防科学技术大学航天与材料工程学院, 2000.
- [3] 黄敏超等. 补燃循环液体火箭发动机启动过程的模块化仿真[J]. 推进技术, 2001,4.

(编辑: 侯 早)

(上接第 62 页)

偏二甲肼库的危险等级是二级, 而控制能力等级是 C 级。控制能力没有和危险等级相匹配, 控制能力未能达到危险等级所要求的 B 级, 说明偏二甲肼库的安全措施和安全管理未达到较理想的状况。

3.6 现实危险性 A

偏二甲肼库发生爆炸的现实危险性为:

$$A = B_1 \prod_{k=1}^3 (1 - B_{2k}) = B_1 B_2 = 818799.6548$$

现实危险性 A 值是固有危险性 B_1 值的 2.3%, 可见有效的安全技术装备和管理会使系统的危险性大大降低。

4 结论

通过对偏二甲肼库建立评价数学模型进行全面评价, 得出以下结论:

(1) 偏二甲肼库发生火灾爆炸事故是极小概

率事件, 但其后果是严重的, 一旦发生爆炸, 可能导致库区内的全体人员死亡或重伤, 库区内的财产毁于一旦, 而且会殃及四邻。

(2) 偏二甲肼库的固有危险性很高, 现实危险性仅为固有危险性的 2.3%, 可见, 加强库房的科学管理可以预防与控制恶性事件发生。

此评价方法, 适用于航天领域类似易燃、易爆、有毒重大危险源的评价。

参考文献:

- [1] GB18218-2000 重大危险源辨识[S]. 中华人民共和国标准.
- [2] GB12268-90 危险货物品名表[S].
- [3] 吴宗之, 高进东, 魏利军编. 危险评价方法及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

(编辑: 王建喜)