

无毒推进剂泵压式变推力发动机工作过程仿真

唐虎, 张涛, 任勇

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 根据无毒推进剂泵压式变推力发动机系统方案, 建立了组件数学模型, 在此基础上进行了工作过程仿真计算, 并对主要影响因素进行了分析。结果表明: 发动机各组件能协调工作, 但起动加速较慢, 发动机变推力时阶跃响应较长; 起动箱气腔容积越大, 起动越快。

关键词: 泵压式; 变推力发动机; 仿真

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2009) 06-0001-04

Computational simulation of a nontoxic propellant pump-fed variable-thrust engine

Tang Hu, Zhang Tao, Ren Yong

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The mathematical models of the main components are established based on a nontoxic propellant pump-fed variable-thrust engine system in this paper. Then the simulation is carried out according to the models and the main influence factors in the working process are investigated. The results indicate that the engine subassembly can work harmoniously, but the start-up process is slow. The jump time is long when the engine varies thrust. Larger volume of start-tank results in less start-up time.

Key words: pump-fed engine; variable-thrust engine; simulation

收稿日期: 2009-08-29; 修回日期: 2009-09-20。

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

0 引言

变推力火箭发动机不仅可以对弹道导弹和空间飞行器的飞行特性进行精确控制,还可以使其具备大范围不同轨道机动的能力。对载人空间探测,变推力发动机尤其重要,单台变推力发动机具有多台固定推力发动机相同的功能,相对于多台固定推力发动机组合,它可以减小空间和系统质量。

上世纪90年代末,随着航天技术的发展以及环保要求的日益提高,航天推进系统采用无毒无污染推进剂成为发展的趋势。对无毒推进剂泵压式变推力发动机进行了工作过程仿真研究。

1 计算模型

发动机采用泵压式供应系统,燃气发生器循环;采用单组元催化分解发生器和再生冷却推力室,推力室点火采用催化点火方案;涡轮泵采用涡轮与泵同轴的传动布局,起动箱起动,采用流量调节器控制副系统流量,实现变工况调节。

根据发动机系统及工作原理,建立计算模型,主要包括:推进剂管路输送模型、起动箱模型、发生器模型、涡轮泵模型、推力室模型及调节器模型。

1.1 推进剂管路输送模型

推进剂管路包括氧化剂和燃料管路,模型如图1所示。

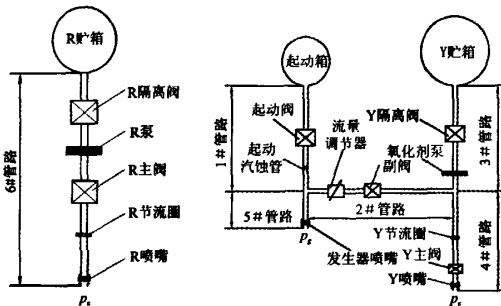


图1 推进剂管路输送模型

Fig.1 Propellant pipeline model

当管路不含汽蚀管或者含有汽蚀管但未发生汽蚀时,计算如下:

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

当管路含有汽蚀管且发生汽蚀时,计算如下:

$$B_s \frac{dq}{dt} = p_i - p_s - k_s q^2 \quad (2)$$

当管路含有泵时,计算如下:

$$B \frac{dq}{dt} = p_i + h_p - p_e - kq^2 \quad (3)$$

式中, B 、 k 分别为管路的惯性损失系数和流阻损失系数; B_s 、 k_s 分别为管路含有汽蚀管且汽蚀时的惯性损失系数和流阻损失系数; h_p 为泵扬程; p_i 、 p_e 为管路入口和出口压力; p_s 为推进剂饱和蒸汽压; q 为管路中的流量。

1.2 起动箱模型

起动箱作为发动机起动时的初始能源供应器,其模型如图2所示,分为气腔和液腔。由起动箱内气腔容积变化率等于液腔容积变化率有:

$$\frac{dV_{\text{气}}}{dt} = -\frac{dV_{\text{液}}}{dt} = \frac{q_1}{\rho_y} \quad (4)$$

式中, $V_{\text{气}}$ 、 $V_{\text{液}}$ 分别为起动箱内气腔、液腔容积; ρ_y 为氧化剂密度。



图2 起动箱模型

Fig.2 Start tank model

1.3 发生器模型

发生器将进入的氧化剂催化分解为热燃气,为涡轮工作提供工质,根据质量守恒有:

$$\frac{dm_k}{dt} = q_5 - q_{\text{eg}} \quad (5)$$

式中, m_g 为发生器燃气质量; q_{eg} 为流出发生器的燃气流量。

1.4 涡轮泵模型

燃气发生器提供的燃气吹动涡轮, 带动氧化剂和燃料泵转动, 氧化剂和燃料流经各自泵后压力得到提高, 为推力室和发生器提供推进剂。

根据设计燃料泵为开式泵, 氧化剂泵为普通离心泵, 其扬程方程分别为:

$$h_{pr} = a_1 n_1^2 \quad (6)$$

$$h_{py} = a_2 q_{vy}^2 + a_3 q_{vy} n_1 + a_4 n_1^2 \quad (7)$$

式中, h_{pr} 、 h_{py} 分别为燃料、氧化剂泵扬程; n_1 为涡轮泵转速; q_{vy} 为氧化剂泵容积流量; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为系数。

1.5 推力室燃烧模型

氧化剂和燃料泵供给的推进剂, 进入推力室反应后, 生成热的燃气, 经喷管排出, 同时产生发动机需要的推力。

根据质量守恒原则有:

$$\frac{dm_c}{dt} = q_{cy} + q_{cr} - q_{ec} \quad (8)$$

式中, m_c 为推力室燃气质量; q_{cy} 、 q_{cr} 分别为进入推力室氧化剂流量、燃料流量; q_{ec} 为流出推力室的燃气流量。

1.6 流量调节器模型

流量调节器包括流量调节阀和作动器, 流量调节阀由调节锥、壳体组成, 作动器作为驱动器, 由直线步进电机组成, 发动机变推力工作时, 根据指令要求, 作动器驱动流量调节阀上的调节锥动作, 则壳体上节流面积发生变化, 流阻系数发生改变。

流量调节器的控制方程为:

$$A = \frac{q}{C_d \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}} \quad (9)$$

式中, q 为调节器流量; A 为调节器面积; C_d 为调节器流量系数; ρ 为流体密度; p_1 为调节器入口压力; p_2 为调节阀出口压力。

2 仿真结果及分析

根据前面计算模型对变推力工作进行计算。主要结果如图 3、图 4 所示。

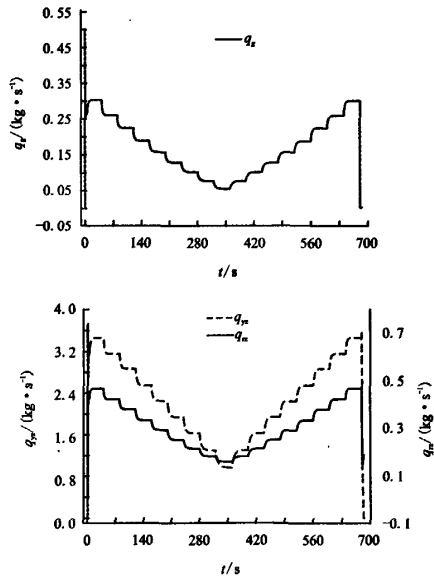


图 3 发生器和燃烧室流量曲线

Fig.3 Curves of gas generator and chamber flow rate

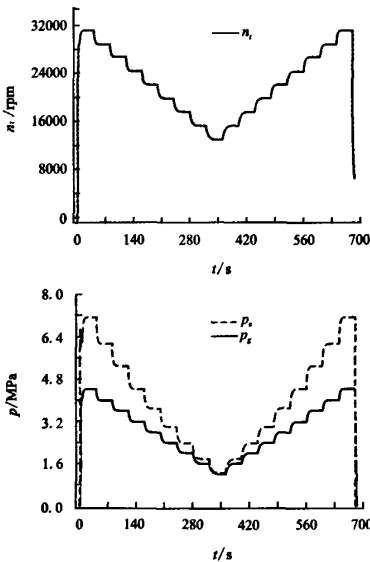


图 4 涡轮转速、发生器及燃烧室压力曲线

Fig.4 Curves of turbine speed, gas generator and chamber pressure

从图 3、图 4 可以看出:

(1) 发动机起动较慢, t_{90} 约为 2.2s。分析认为, 影响起动加速性的主要因素是起动时涡轮获得的功率及涡轮泵系统的转动惯量。因此, 为了提高起动加速性, 可以采用减小涡轮泵转动惯量及提高起动涡轮功率的措施。对于转动惯量, 主要由两部分构成, 一是涡轮转子及泵转子的转动惯量; 二是泵腔内推进剂的转动惯量。综合其他因素考虑, 譬如强度、工艺等, 减小这两项的幅度很有限; 对于起动时涡轮获得的功率, 由于采用单组元催化分解的燃气作工质, 单位质量燃气的做功能力一定, 为了提高功率, 就需要提高起动过程中的流量;

(2) 发动机变推力时阶跃响应较长, 约 10s 后才稳定, 这与泵压式变推力发动机自身特点有关, 由于转动惯量的存在, 要达到平衡需要较长的时间;

(3) 变工况初始转速等参数变化较快, 随后变缓, 这是因为在变工况初始涡轮功率和泵功率差较大, 随后变小, 因此参数变化开始较快, 后面变慢, 这也造成变推力阶跃响应较长;

(4) 关机时, 副阀通气关闭, 发生器流量、压力及涡轮功率迅速降低, 由于转动惯量的存在, 涡轮转速、氧化剂和燃料泵后压力也逐渐降低。

3 影响因素分析

对本方案, 由于发动机组件较多, 影响因素也较多, 通过仿真计算, 研究了主要影响因素:

(1) 起动箱气腔容积。在起动过程中, 起动箱内气体为落压式供应方式, 气腔内气体发生膨胀, 压力降低, 如果容积越大, 压力下降越少, 起动箱气腔容积越大, 则起动越快, 当起动箱容积分别为 5L、3L 和 1L 时, t_{90} 分别约为 1.9s、2.2s 和 5.8s。但另一方面气腔容积越大, 需要的

增压气体越多, 而且起动箱的质量和体积也越大, 因此, 需要综合考虑确定起动箱气腔容积。

(2) 燃料主阀打开时间。根据系统方案, 燃料主阀打开由时间控制。当燃料主阀打开时, 泵功率增加, 将对起动加速性有影响。从计算结果看, 在 0.8~1.6s 内变化时, 燃料主阀打开时间越晚, 起动加速性越快, 但相差不明显。

(3) 阶跃响应。对从同一工况向两个不同工况变推的阶跃响应进行比较, 表明两者相差不大, 说明影响阶跃响应的主要因素不是电机的运动步数, 而是由泵压式系统本身特点决定的。

4 结论

根据对某无毒推进剂泵压式变推力发动机变推力工作过程进行仿真计算, 结果表明:

(1) 本系统方案可行, 各组件能协调工作。

(2) 该系统方案发动机起动较慢, t_{90} 约为 2s。

(3) 发动机变推力时阶跃较长, 约 10s 后才稳定, 这与泵压式变推力发动机自身特点有关。

(4) 起动箱气腔容积越大, 起动越快。

参考文献:

- [1] 唐虎. 变推力发动机仿真计算分析 [J]. 火箭推进, 2008, 34(5): 1-4.
- [2] 刘卫国. MATLAB 程序设计与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 刘国球. 火箭发动机原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [4] 周剑平. 精通 Origin7.0 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [6] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

(编辑: 马 杰)