

可贮存推进剂泵压式液体火箭 发动机多次起动系统研究

张 涛, 唐 虎, 周江平, 董创华
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 在推力超过一定量级、任务时间较长的情况下, 泵压式发动机比挤压式发动机具有明显的技术优势。从国内外上面级及重型空间飞行器推进系统的发展需求来看, 均要求其主发动机具有多次起动工作的能力。针对采用可贮存推进剂的泵压式液体发动机多次起动需求, 对几种可选的多次起动系统方案进行了比较分析, 介绍了起动箱式起动系统的研究情况。

关键词: 泵压式; 火箭发动机; 多次起动

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2010) 03-0015-04

Study on the multi-start system of turbopump-fed rocket engine with storable propellants

Zhang Tao, Tang Hu, Zhou Jiangping, Dong Chuanghua
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: For high level thrust requirement and long duration mission, the turbopump-fed rocket engine has more advantages than that of the pressure-fed rocket engine. To meet the need of the development of propulsion system for upper stage and heavy space vehicle, the engine should have the capability of multi-start. This paper aimed at the need for the multi-start capability of the storable propellant turbopump-fed rocket engine. Several different designs of the multi-start system were analyzed and efforts on the start-tank system development were described.

Key words: turbopump-fed; rocket engine; multi-start

收稿日期: 2010-02-13; 修回日期: 2010-04-07。

作者简介: 张涛 (1971—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机总体设计技术。

0 引言

泵压式液体火箭发动机是一种依靠涡轮泵对液体推进剂进行增压,为推力室、发生器工作提供高压推进剂的火箭发动机。与挤压式发动机相比,在推力超过一定量级、任务时间较长的情况下,采用泵压式发动机,具有明显的技术优势。一方面,经过泵增压后,发动机可以采用较高的系统压力,在一致的性能指标下,能够有效减小发动机的结构尺寸和质量,更好的满足总体安装要求;另一方面,由于发动机采用了泵对推进剂进行增压,对总体贮箱压力的要求仅仅是保证泵正常工作时的入口压力,贮箱压力低,从而可以使总体推进剂贮箱及其增压系统得到简化,降低整级或飞行器的总结构质量。

从国内外上级及重型空间飞行器推进系统的发展情况来看,泵压式发动机有其良好的应用前景,但需具有多次起动工作的能力。本文针对泵压式液体发动机多次起动需求,对多次起动系统方案进行了比较分析,介绍了起动箱式起动系统的研究情况。

1 多次起动系统方案比较

起动系统的主要功能是为发动机涡轮泵的起动提供最初的能量源。为完成这一功能,可供选择的多次起动系统方案主要包括如下几种:

(1) 自身起动。发动机自身起动方案是依靠贮箱压力,将推进剂挤入燃气发生器,燃烧后产生的燃气驱动涡轮,带动泵起旋,泵后压力升高,使得进入燃气发生器的推进剂流量逐渐增大,涡轮泵逐渐达到额定工作状态。自身起动系统是一种最简单的多次起动系统方案,在发动机系统上,不需要设置任何多余的功能组件。采用这种起动系统时,发动机起动响应时间较长,并且要求燃气发生器必须能够在较低的推进剂喷注压降及室压下稳定可靠工作。

(2) 火药起动器起动。火药起动器起动方式,是目前国内外多次起动发动机上常用的一种起动

方式。采用火药燃烧产生的燃气作为涡轮泵起动的最初能量源,驱动涡轮并带动泵起旋,当涡轮泵的转速及泵出口压力达到一定值后,来自泵出口的推进剂进入燃气发生器,燃烧后产生燃气,与火药起动器同时工作。当火药燃尽后,火药起动器停止工作,由来自泵出口的推进剂单独维持发动机工作,直至关机。从目前的技术发展水平来看,一台火药起动器只能进行一次工作,当发动机需进行多次工作时,需要安装多个火药起动器,由于火药起动器自身结构尺寸、质量及发动机安装空间的限制,因此,火药起动器起动方式只能应用于对起动次数要求较少的发动机上,一般不超过 3 次。

(3) 吹气起动。从原理上讲,吹气起动可以被认为是火药起动器起动方式的一种变形。发动机起动时,采用高压气体吹动涡轮并带动泵起旋,当涡轮泵的转速及泵出口压力达到一定值后,停止吹气,由来自泵出口的推进剂进入燃气发生器,燃烧后产生燃气,接替高压气体并维持发动机工作。由于高压气体的做功能力远小于燃气发生器产生的推进剂燃气,因此,起动过程中,高压气体的消耗量较大,从而限制了发动机多次起动次数的进一步增加。采用这种起动方式时,一般需在发动机上设置起动涡轮,很少用高压气体直接吹动主涡轮。起动系统停止工作后,起动涡轮成为了发动机上的一个负载,对发动机性能可能产生轻微影响。

(4) 起动箱起动。起动箱是设置在发动机上的小容积高压贮箱,推进剂与发动机相同。发动机起动时,起动箱内的推进剂直接挤压进入燃气发生器,燃烧后产生燃气,驱动涡轮并带动泵起旋,当涡轮泵的转速及泵出口压力达到一定值后,起动箱停止工作,由来自泵出口的推进剂进入燃气发生器,维持发动机工作。起动箱内的推进剂可以在发动机起动前或工作过程中得到补充,为下次起动做好准备。采用起动箱起动方案时,发动机上需设置相应的起动系统,主要由相应的控制阀、起动箱、管路及流量调节元件组成。与前述的几种起动方案相比,起动箱式多次起动系统较为复杂。但由于起动箱中的推进剂始

终能够得到补充, 因此, 从理论上讲, 采用起动箱起动方式, 发动机的起动次数可以是不受限制的, 美国研制的通用上面级“阿金纳”系列主发动机中的 8247 发动机, 采用起动箱起动方式, 可以实现 15 次起动。

根据对上述四种发动机多次起动系统方案的对比, 分析认为, 当发动机的起动次数不大于 3 次时, 采用火药起动器方案较为适宜, 当起动次数更多时, 采用起动箱方案为最佳。

2 起动箱式起动系统的研究情况

由于采用起动箱式起动系统具有较强的适应能力, 通过发动机起动过程仿真和多次起动系统热试, 对起动箱式多次起动系统进行了研究。

2.1 发动机起动过程仿真研究

进行发动机起动过程仿真研究的目的是, 分析不同的起动箱初始参数对发动机起动过程的影响。计算中采用的落压式起动箱模型见图 1。

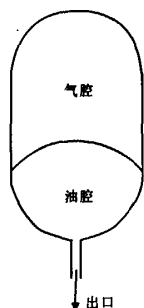


图 1 起动箱模型

Fig.1 Start-tank model

发动机起动时, 起动箱内的推进剂在气腔压力的作用下排出起动箱, 进入燃气发生器, 驱动涡轮转动, 泵后推进剂压力逐渐升高, 由于推进剂排出, 起动箱气腔容积增大, 气体膨胀后压力逐渐下降。当泵后推进剂压力大于起动箱压力时, 来自泵后的推进剂一方面接替起动箱, 继续为燃气发生器供应推进剂; 另一方面对起动箱进行反充填, 为再次起动作好准备。对初始压力相同、不同初始气腔容积下, 发动机起动过程中起动箱压力变化进行对比仿真分析, 计算结果如图

2 所示。对初始气腔容积相同、不同初始压力下, 发动机起动过程中起动箱压力仿真计算结果如图 3 所示。图 2 和图 3 中, V_0 为起动箱液腔初始容积; p_0 为发动机稳态工作时, 泵出口压力。

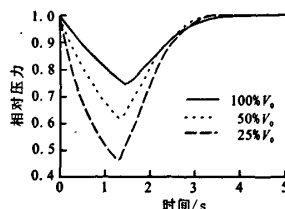


图 2 起动箱压力仿真曲线

(初始压力相同、初始气腔容积不同)

Fig.2 Calculated pressure of the start-tank
(same p_0 , different V_0)

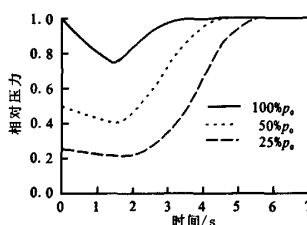


图 3 起动箱压力仿真曲线

(初始气腔容积相同、初始压力不同)

Fig.3 Calculated pressure of the start-tank
(same V_0 , different p_0)

从图 2 和图 3 可见, 发动机起动后, 起动箱压力随液体推进剂的排出先呈现一个下降的过程, 经过一段时间后, 来自泵后的推进剂开始对起动箱进行反充填, 此后起动箱压力开始转头向上爬升, 压力逐渐升高。由于起动箱压力升高, 泵后推进剂对起动箱的反充填流量逐渐减小, 最后起动箱压力与泵出口压力达到平衡, 泵后推进剂不再反充填进起动箱, 此后, 起动箱压力维持为泵出口压力。各压力曲线先下、后升的拐点为泵后推进剂对起动箱进行反充填的起始点。

从图 2 可见, 当起动箱初始压力相同时, 初始的气腔容积越小, 则在起动前段, 起动箱压力的下降速度越快、下降幅度越大, 泵后推进剂对起动箱进行反充填的开始时间越早, 起动箱压力与泵出口压力达到平衡的时间也越早。

从图 3 可见,当起动箱初始气腔容积相同时,初始气腔压力越小,则在起动前段,起动箱压力的下降速度越慢、下降幅度越小,泵后推进剂对起动箱进行反充填的开始时间越晚,起动箱压力与泵出口压力达到平衡的时间也越晚。

根据图 2、图 3 对比结果,分析认为,当采用落压式起动箱时,可以将起动箱初始气腔容积设计得小一些,初始压力应设计为发动机稳态工作时泵的出口压力。

2.2 多次起动系统热试研究

试验中,采用起动箱作为系统起动的初始能量来源,为燃气发生器的起动提供初始能量;采用高压贮箱模拟泵增压系统,实现对起动箱的多次充填和维持燃气发生器的持续工作。

起动箱及燃气发生器联合试验系统成功进行了 8 次起动和工作,达到了预期的试验目的。典型的试验曲线如图 4 所示。通过起动箱及发生器联合试验验证了:(1) 起动箱多次起动系统的可行性;(2) 初步证明了仿真计算结果的正确性。

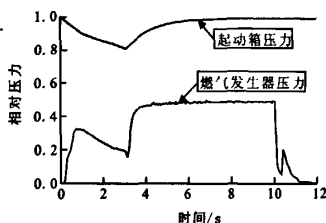


图 4 起动箱及发生器联合试验典型曲线

Fig.4 Typical test pressure curves of start-tank and generator

3 多次起动系统的选择

根据上文内容,在进行发动机系统设计时,有多种可选的多次起动系统方案。根据各方案的特点,应遵循如下原则:

(1) 在满足总体技术要求的前提下,所选择的方案应使系统尽可能简单、可靠;

(2) 不同多次起动系统方案的选择可按图 5 所示顺序进行。

此外,针对某种已经选定的方案,在进行系统设计时,应根据发动机系统的特点进行调整。例如,对起动箱式起动系统,可以采用上文中研

究的落压工作方式,即起动箱中气体总量保持不变,起动箱工作过程中,依靠气体的膨胀提供挤压压力。采用这种工作方式时,不需要附加的气源,起动箱中的推进剂由泵后提供,并且起动箱初始压力基本上与发动机稳态工作时泵出口压力相当。还可以采用恒压工作方式,即通过对起动箱气腔中气体补充和释放,保持起动箱工作过程中压力的恒定。采用这种工作方式时,起动箱中的推进剂可以由泵后提供,也可以直接由贮箱提供,但由于多次起动过程中,起动箱中挤压气体是不断消耗的,因此,需要有额外的附加气源。

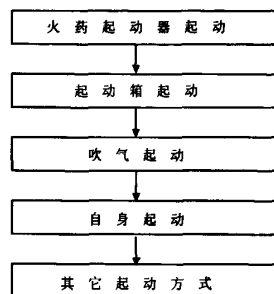


图 5 起动方案的选择顺序

Fig.5 Selection of the start mode

4 结束语

对几种发动机多次起动系统方案进行了比较,介绍了起动箱方案的研究情况,提出多次起动系统的选择思路,为多次起动发动机的系统设计提供参考。

参考文献:

- [1] 刘国球. 液体火箭发动机原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [2] 休泽尔 D K. 液体火箭发动机现代工程设计 [M]. 朱宁昌译. 北京: 宇航出版社, 2004.
- [3] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1992.
- [4] 江宏俊. 液体力学[M]. 西安: 高等教育出版社, 1985.

(编辑: 马 杰)