

# 液氧/煤油发动机试验 起动过程推进剂供应技术

李伟民

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 介绍了液氧/煤油发动机试验起动过程中的煤油供应技术。主要叙述起动容器系统的设计、主容器和起动容器接力工作和两个容器同时工作的工作方法及试验程序以及两个容器同时工作时起动容器液面的控制方法及影响因素。

**关键词:** 液氧/煤油发动机; 试验; 煤油供应; 起动技术

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2006)03-0056-07

## Technology of propellant supply in starting of LOX/kerosene engine testing

Li Weimin

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

**Abstract:** The article discusses the technology of kerosene supplying in the starting of LOX/kerosene rocket engine testing. The main contents consist of the main starting tank system design, the relay supplying between the main tank and the starting tank, the operating method and testing program of the two tanks synchronizing supply, the control method and influencing factor of liquid level in the tank when the two tanks synchronize.

**Key words:** LOX/kerosene rocket engine; test; kerosene supply; start technology

### 1 引言

液氧/煤油发动机是一种新型的闭式循环发动机, 其试验的起动过程有别于常规发动机, 起

时对试车台试验系统的要求较多。我们从 1995 年进行液氧/煤油发动机试验起至今已进行了半系统试验、涡轮泵联试及发动机试验数十次, 本文在多次试验及调试的基础上, 总结、介绍液氧/煤油发动机试验的起动技术。主要叙述起动容器系统

收稿日期: 2006-01-15; 修回日期: 2006-04-20。

作者简介: 李伟民 (1967—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机试验工艺。

的设计;主容器和起动容器接力工作和两个容器同时工作的工作方法及试验程序;主容器和起动容器同时工作时起动容器液面的控制方法及影响因素。

## 2 液氧/煤油发动机与常规发动机起动时的差异

### 2.1 常规发动机的起动要求及方法

常规发动机,因发动机的燃料、氧化剂系统都设有起动阀门,发动机内腔的充填在开车 0 秒后完成,对试车台仅要求保证一定值的稳定的入口压力。试验系统按任务书的入口压力要求,按下式计算推进剂容器的预增压压力。

$$p_0 = p_i - \rho gH \times 10^{-6} + \Delta p \quad (1)$$

式中,  $p_0$  为容器的增压压力, MPa;  $p_i$  为发动机要求的入口压力, MPa;  $\Delta p$  为推进剂供应系统的系统流阻, MPa;  $\rho$  为推进剂密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度, 取  $9.81\text{m/s}^2$ ;  $H$  为发动机入口至推进剂容器内液面的静液柱高度, m。

由公式(1)可知,开车前,因流量为零,所以系统流阻  $\Delta p$  也等于零,而入口压力  $p_i$  则高出一个  $\Delta p$  值,因发动机设有起动阀门,试验允许在预增压时就高出系统流阻值,即按(1)式计算的预增压值  $p_0$ ,进行预增压,满足压力要求就开车。开车后由于推进剂流动而产生流阻  $\Delta p$ ,并逐渐增大,高出的数值逐渐减小,这一减小的过程也就是发动机腔体的充填过程和起动过程。

### 2.2 液氧/煤油发动机的起动要求

液氧/煤油发动机的燃气发生器在高压富氧条件下起动工作,工作条件比较恶劣,在不设预压泵时,入口压力值较高。同时因为液氧/煤油发动机不设起动阀门,对入口压力的要求较为严格,特别是液氧系统,起动时的入口压力直接决定进入燃气发生器的液氧流量。进入燃气发生器的液氧太多,混合比太大,导致点不着火;若进入的液氧太少,混合比太小,则导致燃气温度偏高。因此必须保证液氧系统的入口压力。

另外,由于液氧/煤油发动机腔体内在开车前就已加注推进剂,起动时无充填发动机腔道这一

过程,其起动时的流量变化率较大,因此必须考虑推进剂的惯性流阻,此时容器的增压压力与入口压力的关系可用下式表达:

$$p_0 = p_i - \rho gH \times 10^{-6} + \Delta p + \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A_i} \cdot \frac{dq}{dt} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中,  $\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{A_i} \cdot \frac{dq}{dt} \times 10^{-6}$  为推进剂供应系统的惯性流阻, MPa;  $A_i$  为推进剂供应系统的主管道面积,  $\text{m}^2$ ;  $L_i$  为推进剂供应系统的主管道长度, m;  $\frac{dq}{dt}$  为推进剂的流量变化速率,  $\text{kg/s}^2$ 。

由公式(2)可知,若按常规发动机的试验方法进行预增压后开车,显然(2)式中后二项之和很大,其入口压力  $p_i$  在开车前后的变化就很大,不能满足发动机起动的要求,所以必须采取措施,保证入口压力稳定在一定范围内。

## 3 起动容器系统的设计及工作方式

### 3.1 起动容器系统的设计

分析公式(2)可知,要稳定入口压力  $p_i$ ,减少容器内气体压力在开车前后的变化,最有效的方法是缩短推进剂容器至发动机入口的推进剂供应管道长度,增大管道内径,减少系统流阻和惯性流阻。在系统设计时往往增大管道内径的做法受管道设备等的限制而不容易做到,而缩短管路长度的做法有前苏联的成功经验可供借鉴,即在靠近发动机入口的管道上设计安装起动容器系统,组成专门供应发动机开车起动时的液氧和煤油的起动容器系统。2<sup>#</sup>台液氧供应系统的起动容器至发动机的管道长度为 8.8m,主容器至发动机的管道长度为 32.2m。起动容器的设立,不仅减少了系统流阻,而且也减少了惯性流阻,使得起动时的入口压力变得相对平稳。

### 3.2 起动时的工作方式选择

设立起动容器后,起动时的工作方式就有主容器与起动容器两个同时工作和一先一后接力工作的选择,前苏联的经验是采用两个容器同时工作的方式。

当时 2<sup>#</sup>台的液氧系统,其管道内径为  $\phi 207$ 。起动时的最大值约为  $1000\text{kg/s}^2$ ,在此情况下,起动容器至发动机的系统流阻和惯性流阻之和约为

0.23MPa, 主容器至发动机的系统流阻和惯性流阻之和约为 0.54MPa。采用两个容器同时工作, 即开车前打开 A1、A1b, 两个容器连通。这种工作方式, 起动容器和主容器在开车后必须迅速提升箱压 0.23MPa 和 0.54MPa, 否则将引起两容器内液氧相互倒灌并产生入口压力凹坑, 不能满足试验要求。采用这种工作方式时, 起动容器和主容器提升箱压时的增压气体流量可按下式计算:

$$G_B = \frac{p_0^b Q}{RT} \times 10^3 + \frac{(p_0^b - p_0^a) \times V^a}{RT(t_2 - t_1)} \times 10^6 \quad (3)$$

式中,  $G_B$  为增压气体流量, kg/s;  $p_0^a$ 、 $p_0^b$  为程序时间  $t_1$ 、 $t_2$  时的容器内增压气体压力, MPa;  $t_1$ 、 $t_2$  为程序时间, s;  $V^a$  为  $t_1$  时的容器内气垫量,  $m^3$ ;  $R$  为气体常数, 取 296.9J/kg·K;  $T$  为气体温度, 约取 200K。

按照 (3) 式经粗略估算, 起动容器的增压气体流量约为 2.8kg/s, 主容器系统的增压气体流量约为 23kg/s。当时 2<sup>#</sup>台增压气体供应系统的增压能力相差甚远。所以这种两个系统同时工作的方法无法采用, 转而摸索出采用两个容器一先一后的接力工作方式。即起动容器系统先工作, 完成起动后由主容器接替工作, 这种工作方式满足试验要求, 但是具体做法较复杂。

分析两个容器接力工作的控制程序, 进入程序的试车台阀门动作有 11 台次, 在程序中有那么多的动作是不合理的, 并且在试车中已出现阀门不能准时打开的情况, 已经危及试验的成败, 为了提高试车台系统工作的可靠性, 因此有必要改变成两个容器同时工作的方式。

两个容器同时工作的方式是开车前连通主容器和起动容器, 开车时两个容器都参加起动, 完成起动后起动容器退出工作。目前采用的就是这种方法。其进入程序的试车台阀门动作仅 3 台次。有利于试验系统工作可靠性的提高。采用两个容器同时工作的方式是建立在以下基础上的:

首先, 随着试验研制的进展, 试车台气路系统的增压管道已由 DN65 改造成 DN100, 增压减压器由一台增至二台。试车台推进剂管道起动容器至发动机管道液氧系统已由 DN200 改成 DN300, 煤油系统已由 DN150 改成局部 DN200, 通过上述改造提高了试车台的增压能力, 减少了

系统流阻和惯性流阻。

其次, 随着发动机研制的进展, 降低了入口压力值, 对两个容器同时工作这种方式在理论上有了进一步的认识。

## 4 两容器接力工作的方法

### 4.1 两容器接力工作的增压方式

当采用两系统接力工作的方式时, 起动容器按任务书入口压力要求进行预增压, 预增压压力值按 (2) 式计算, 不考虑系统流阻和惯性流阻这两项。在开车的同时对起动容器进行大流量增压, 迅速提高起动容器的压力, 抵消系统流阻和惯性流阻造成的压降, 保证起动时的入口压力。此后停止增压, 使其压力按气垫膨胀下降, 处于退出工作的状态。

主容器在预增压时就增压到稳定段工作时的要求值, 该要求值按 (1) 式计算, 即把流阻损失先增上去, 接力工作时随着流阻损失的逐渐产生而抵消, 满足入口压力的要求。此后增压气体流量按补足推进剂流出空间和液柱下降量确定。通过冷调试验和热试车验证, 该方法满足试验要求。

### 4.2 两容器接力工作的试验程序

当采用两系统接力工作的方式时, 主容器何时开始接班, 两个系统共同工作多长时间, 以及如何保证交接班过程中的压力平稳是一个实际问题。

通过冷调试验, 发现在交替工作过程中产生了入口压力凹坑, 压力凹坑的大小视各种情况而不同, 同时伴有主容器推进剂流入起动容器和起动容器推进剂往主容器倒灌的情况。针对上述情况, 经大量调试及多次试验验证证明, 通过控制两个容器接力时的压力, 使其在接力时保持至汇合处的压力相等, 可以避免推进剂相互流入和压力凹坑的产生。同时还必须控制起动容器的隔离阀关闭速度, 防止压力凹坑的产生。通过上述措施解决了问题。两系统交替工作的试验程序大致如下:

(1) 将主容器系统的接力时间安排在发动机完成起动后, 即开车后 2~3 秒时打开主容器隔离阀 A1(B1), 准备接力;

(2) 起动容器的退出时间由阀门 A1(B1) 的打

开速度和A1b(B1b)的关闭速度决定,2<sup>#</sup>台A1阀门的打开时间:从给指令到完全打开约需0.47秒(B1约需0.51秒),两系统阀门完全打开,起动容器系统和主容器系统同时工作的时间,液氧系统和煤油系统均为1.5秒左右。即从4秒开始发出关闭起动容器隔离阀A1b(B1b)的指令,准备退出;

(3) 主容器系统的增压阀门A7(B7)与隔离阀A1(B1)同时打开,起动容器系统的增压阀门A7a、A8a(B7a)的打开时间由任务书要求的发动机氧主阀打开时间和系统增压能力决定。关闭时间由调整计算决定,调整计算确定关闭增压阀门的原则是该路孔板的增压能力、容器所需压力及时间要求;

(4) 在冷调试验中发现A1b、B1b的关闭速度较快,约为0.5秒到0.7秒。在接力工作过程中阀门的关闭速度太快也将引起压力凹坑,为此在A1b(B1b)的关闭腔操纵气管道上增加了节流孔板,以调节A1b(B1b)的关闭速度。目前在A1b、B1b关闭腔操纵气管道上加的节流孔均为 $\phi 1.5$ ,将A1b从给指令到全部关闭所需时间由0.5秒延长到约3.1秒,将B1b的关闭所需时间由0.7秒延长到2.3秒。

#### 4.3 起动容器的增压方法

液氧/煤油发动机试验,尽管在系统上设有起动容器,缩短了管道长度,但起动时的惯性流阻仍较大。为此要求起动容器的增压系统能在试验程序的某个时间点开始增压,迅速提升起动容器箱压 $p_0$ ,确保入口压力 $p_i$ 不低于泵的气蚀压力,此后还应保持箱压。为此发动机试验采用的增压方法及技术状态如下:

(1) 增压系统采用减压器加多路增压孔板的增压方式,增压时可以选择多种流量组合,准确控制增入的气体量;

(2) 采用能均匀扩散增压气体的起动容器增压气体扩散管,尽量保证增入容器的氮气不扰动推进剂液面,保持气体温度分层均匀;

(3) 选择打开、关闭时间短且重复性好的气动增压阀,通过准确测量打开阀门或关闭阀门所需时间,为增压系统的调整计算和控制程序制定提供保障。液氧起动容器的增压阀A7a、A8a从-0.04秒开到0.65秒关;

(4) 通过理论计算、冷调试验和试验验证,确定了各路增压系统的增压能力及系统特性;

(5) 在液氧容器内安装电容式液面计、差压式液面计及温度测点,测准容器内液面高度和气体温度,确保推进剂加注量和气垫量的准确无误;

(6) 严格控制接力时主容器和起动容器的压力,保证主容器和起动容器至汇合处的压力相等;

(7) 设置小流量增压孔板,保证预增压压力缓慢上升,并在开车前提前预增压,使其增压入容器内的气体换热充分,保证预增压压力相对稳定。

采用以上增压方法及技术状态的控制,按照试验任务书的要求,通过调整计算,可以较准确地确定试验程序、减压器出口压力及增压孔板直径。可以保证发动机的起动正常,满足试验任务书的要求。

## 5 两个容器同时工作的方式

### 5.1 主容器压力变化对起动容器压力及液面的影响

作为试车台推进剂供应系统,在试验起动前,必须保证入口压力符合试验任务书的要求,容器内的推进剂加注量必须满足试验耗量、安全剩余量和气垫量的要求,特别是必须保证起动容器的加注量和气垫量。

采用两个容器同时工作的方式,在开车前必须打开A1和A1b,使两容器连通,两容器连通后按下式平衡压力和液面高度:

$$p_1 + \rho g H_{\pm} \times 10^{-6} = p_2 + \rho g H_{\text{启}} \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中, $p_1$ 为主容器压力,MPa; $p_2$ 为起动容器压力,MPa; $H_{\text{启}}$ 为起动容器液面至 $p_{i0}$ 测点高差,m; $H_{\pm}$ 为主容器液面至 $p_{i0}$ 测点高差,m。

加注及预增压时应按公式(4)要求,通过控制容器在连通前的液面及压力,保证连通后其液面和压力都维持不变,这一要求从理论上讲可以做到,但是实际上做不到。如主容器压力因增压气体温度的下降而要随时间缓慢下降或由于增压而造成主容器压力升高,起动容器的情况也相同。特别是起动容器内的推进剂被大量挤出或压入,将造成试验失败。因此必须计算出主容器压力变化引起的起动容器压力和液面的变化量。

分析液氧系统，则有：

$$p_2' + (H_{\text{启}} - \Delta H) \rho g \times 10^{-6} = p_1' + (H_{\text{主}} - \Delta H / B) \rho g \times 10^{-6} \tag{5}$$

$$p_2 \cdot V_2 = p_2' \cdot V_2' \tag{6}$$

$$(V_2' - V_2) / S_2 = \Delta H \tag{7}$$

式中， $p_2'$ 为起动容器变化后的压力，MPa； $\Delta H$ 为起动容器液面变化高度，m； $p_1'$ 为主容器变化后

的压力，MPa； $B$ 为两容器的面积比， $B = \frac{S_1}{S_2} = \frac{6.15}{1.5386} \approx 4$ ； $S_2$ 为起动容器截面积，内径  $\phi$  1400、截面积  $1.5386\text{m}^2$ ； $S_1$ 为主容器截面积，内径  $\phi$  2800、截面积  $6.15\text{m}^2$ ； $V_2$ 为起动容器气垫量，取  $1.4\text{m}^3$ ； $V_2'$ 为起动容器变化后的气垫量。  
设定主容器起始压力  $p_1$ ，按（4）、（6）、（7）公式计算，得到的结果列于表 1。

表 1 主容器起始压力  $p_1$

Tab.1 Initial pressure  $P_1$  of the main tank

序号	主容器起始压力/MPa	起动容器起始压力/MPa	主容器压力变化量	起动容器气垫压力/MPa	起动容器内液氧变化量/L	起动容器液面变化量/mm
1	0.8	0.833	-0.02（0.78）	0.813	-34.4	-22.4
2			-0.04（0.76）	0.793	-69.0	-44.8
3			+0.02（0.82）	0.853	+32.8	+21.3
4			+0.04（0.84）	0.873	+64.1	+41.7
5	0.4	0.433	-0.02（0.38）	0.413	-67.8	-44
6			-0.04（0.36）	0.393	-142.5	-92.5
7			+0.02（0.42）	0.453	+61.8	+40.1
8			+0.04（0.44）	0.473	+118.4	+76.9

由计算结果可知：

(1) 在主容器起始压力为 0.8MPa 时，主容器增压或泄压 0.02MPa（0.04MPa），起动容器压力随之上升或下降 0.02MPa（0.04MPa），起动容器内液面随着主容器的增压上升 21.3mm(41.7mm)，随着主容器的泄压液面下降 22.4mm（44.8mm）；

(2) 当主容器起始压力为 0.4MPa 时，主容器增压或泄压 0.02MPa（0.04MPa），起动容器压力随之上升或下降 0.02MPa（0.04MPa），起动容器内液面随着主容器的增压上升 40.1mm(76.9mm)，随着主容器的泄压液面下降 44mm（92.5mm）。

以上结果表明，主容器增压或泄压引起压力的变化小于 0.04MPa，起动容器的液面变化小于 100mm，起动容器液氧加注高度 2m，变化 100mm 应该是允许的。所以适当控制主容器的压力变化量，就可以满足试验要求。试验也是在这样的情况

下进行的。上述理论计算结果与实际情况基本一致。粗略的计算可以按（5）式进行，其误差较小。

5.2 起动容器增压或泄压对液面的影响

在实际工作中，两容器连通后，起动容器也有可能增压或泄压。由此也将引起原来平衡的液面发生变化。两容器连通后起动容器增压或泄压引起的起动容器液面变化量，可按下式计算：

$$p_2' + (H_{\text{启}} - \Delta H \cdot B) \rho \cdot g \times 10^{-6} = p_1' + (H_{\text{主}} - \Delta H) \rho g \times 10^{-6} \tag{8}$$

$$p_1 \cdot V_1 = p_1' \cdot V_1' \tag{9}$$

$$(V_1' - V_1) / S_1 = \Delta H \cdot B \tag{10}$$

式中， $V_1$ 为主容器气垫量，取  $32.5\text{m}^3$ ； $V_1'$ 为主容器变化后的气垫量。

设定起动容器起始压力  $p_2$ ，按（4）、（8）、（9）、（10）公式计算，得到的结果列于表 2。

表 2 起动容器起始压力  $p_2$  变化值  
Tab.2 Initial pressure variables of the starting tank

序号	起动容器 起始压力/MPa	主容器起 始压力/MPa	起动容器压 力变化量	主容器气 垫压力/MPa	起动容器内 液氧变化量/L	起动容器 液面变化量/m
1	0.833	0.800	-0.02（0.813）	0.785	+607.6	+395.2
2			-0.04（0.793）	0.771	+1226	+797.2
3			+0.02（0.853）	0.815	-579.3	-376.8
4			+0.04（0.873）	0.829	-1151.3	-747.7
5	0.433	0.400	-0.02（0.413）	0.389	963.7	625.8
6			-0.04（0.393）	0.377	1945.3	1263.2
7			+0.02（0.453）	0.412	-910.9	-591.5
8			+0.04（0.473）	0.423	-1801.5	-1169.8

由计算结果可知：

(1) 在起动容器起始压力为 0.833MPa 时，起动容器增压或泄压 0.02MPa（0.04MPa），主容器压力随之上升或下降 0.015MPa（0.029MPa）；起动容器内液面随着起动容器的增压下降 377mm（748mm），随着容器的泄压液面上升 395mm（797mm）；

(2) 当起动容器起始压力为 0.433MPa 时，起动容器增压或泄压 0.02MPa（0.04MPa），主容器压力随之上升或下降 0.012MPa（0.023MPa），容器内液面随着起动容器的增压下降 592mm（1170mm），随着起动容器的泄压液面上升 626mm（1263mm）。

以上结果表明，两容器连通后起动容器增压或泄压引起液面的变化很大，所以在两容器连通后起动容器不能增压或泄压。起动容器的液面高度由连通前的加注液面高度保证，起动容器的压力由连通前的预增压保证。

在实际的试车工作中就是依据计算及分析结果，根据任务书的要求值及推进剂加注高度，按（1）式进行计算，确定两个容器的预增压压力。开车前严格按照要求保证起动容器的液面高度和两个容器的预增压压力，两个容器连通后，起动容器不增压也不泄压，主容器在压力下降低于要求

值时进行补压。

5.3 两个容器同时工作的试验程序

两个容器同时工作是一个典型的试验程序，由程序可知，开车前，由 A7、A7a 进行预增压，在起动程序前，打开 B1b，使煤油系统的两个容器连通，到起动程序后，打开 A1b，使液氧系统的两个容器连通，其原因是煤油温度为常温，预增压后压力值基本不变。而液氧为低温推进剂，预增压压力不断地因增入气体的冷却而下降，所以安排在离开车时间近一些连通。两容器连通后，对主容器预增压压力实施上、下限控制，低于下限程序自动补压，补到高于上限时自动停止。起动容器则不补压也不泄压，目前的试验仅要求容器内箱压稳定在某一值，比较容易做到。

开车后，起动容器靠气垫膨胀工作，工作至 3 秒时发出关闭指令，约 3 秒后 A1b、B1b 完全关闭，起动容器退出工作。从理论上讲也可以不关闭 A1b、B1b，将起动容器作为蓄压器使用。

开车后，煤油主容器靠气垫膨胀工作，液氧主容器在 0 秒时，打开 A8 进行增压直至停车，增压气体流量按补足推进剂流出空间和液柱下降量确定。理论上维持入口压力不变。

上述情况是在仅要求保证容器箱压时的试验，起动后的入口压力比起动前的预增压压力低，

随着发动机研制的进展,其入口压力将不断下降,那时将提出开车后必须迅速提升主容器压力和起动容器压力的要求,即要求起动后的入口压力与起动前相同,所以必须在起动后对容器进行迅速的增压,提高容器压力,消除系统流阻及惯性流阻对入口压力的影响。根据目前 2 号台的情况,增压能力已经满足要求,在试验程序中增加 A8、A8a 等增压阀门,增压气体流量按(3)式确定,可以满足试验任务书的要求。

## 6 结论

至今已成功进行了近三十次液氧/煤油发动机联动装置、半系统、整机试车,其中前二十次采用起动容器和主容器接力工作方式,从 10000、9A 次试车开始采用起动容器和主容器并联工作方

式,均取得了理想效果。通过以上分析比较,可以得出以下结论:

(1) 推进剂供应系统设置起动容器后,可以有效地减小起动时的系统流阻和惯性流阻,满足液氧/煤油发动机试验的要求;

(2) 两个容器接力工作和两个容器同时工作这两种方法都可以满足试验要求,而采用两个容器同时工作比两个容器接力工作方法简单、工艺过程简化、可靠性高;

(3) 采用两个容器同时工作的方法,当两个容器连通后,主容器增压与泄压对起动容器的液面高度影响不大,而起动容器的增压与泄压对起动容器液面高度影响很大,起动容器在连通后至起动前不应该增压或泄压。

(编辑:王建喜)

\*\*\*\*\*

(上接第 43 页)

发展各种类型的硅片式微推力器对未来皮、纳卫星的控制应用具有重要意义。与国外相比,在化学推进系统,尤其是电推进系统的研究和应用都有较大差距,应该给予更多的重视和投入。建议根据我国现有条件,以发展脉冲等离子推进为主兼顾场发射和微加工硅片式微推进形式,以推动我国微小卫星事业的发展。

### 参考文献:

[1] 吴汉基,蒋远大,张志远.电推进技术的应用与发展

趋势[J].推进技术.2003(5).

[2] 吴汉基.脉冲等离子体电火箭在卫星控制方面的应用[J].电工电能新技术.1986(3).

[3] R M Myers, S R Oleson, Melissa Mcguire, et al. Pulsed plasma thruster technology for small satellite missions[C]. In: Proc. of the 9th annual AIAA/USU Conf. of small satellite, 1995.

[4] Gregory G, Spanjers, Daron R, Bromaghim, et al. AFRL MicroPPT development for small spacecraft propulsion[R]. AIAA 2002-3974.

[5] 边炳秀.卫星推进系统的历史、现状和未来[J].控制工程.2001(5).

(编辑:侯 早)