新型液体火箭发动机试车台起动试验系统方案设计

耿文忠
(西安航天动力试验技术研究所，陕西 西安 710100)

摘 要：为满足总体对发动机地面试验入口压力的设计要求，提出了三种试车台起动试验系统设计方案。论证表明，设计方案可行，布局紧凑、合理。综合考虑，确定起动容器与主容器接力试验系统作为新建台的设计方案。

关键词：试车台；发动机起动试验；方案设计

中图分类号：V434 **文献标识码**：A **文章编号**：(2008) 03-0049-05

Tentative design of starting test system for new liquid rocket engine test bed

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

Abstract: To meet the engine ground test inlet pressure design requirements of the general proposal and the design task document. Three tentative designs of starting test system of the test bed were proposed and their feasibilities were proved. Upon the construction document of the new test bed, the optimum design of starting tank with the combination of compact layout and the reasonable structure design was stated in this paper. The new design of starting test system of the test bed meets the general design proposal requirements on the engine ground starting test, and provides the experience for the future test bed building.

Key words: test bed; engine starting test; tentative design

收稿日期：2007-09-27；**修回日期**：2008-02-13。

作者简介：耿文忠（1950—），男，高级工程师，研究领域为液体火箭发动机试验技术。

万方数据

1 引言

新型液体火箭发动机是上面级二次起动发动机，它采用液氧/煤油推进剂，化学点火，火药起动，具有单向与双向摇摆能力。燃气发生器在高压富氧条件下起动，工作条件比较恶劣，对起动前后及起动过程中的入口压力要求较为严格，动态流阻大，入口压力较低，起动不好很容易造成泵的汽蚀。总体设计对发动机推进剂入口压力控制得特别严格，提出了明确要求。新建和改造的试车台要满足总体提出的上述技术条件要求，进行发动机地面试车时，所设计的试车台系统还必须满足入口压力要求，试车台贮箱到发动机入口管道长度要尽量短，以减小发动机试车起动时的惯性流阻。

试车台在建台或改造设计时，将依据设计任务书给定的发动机推进剂流量和入口压力进行系统设计计算，以确定推进剂管道的直径，进行试车台工艺系统设计，保证满足发动机试车时的起动特性要求。

2 设计方案

在借鉴国内外试车台设计经验的基础上，提出新建和改造试车台方案，以便进行多种方案讨论。在进行试车台推进剂供应系统设计时，计算确定了推进剂管道直径后，还要满足下式：

$$L/A \leqslant M \tag{1}$$

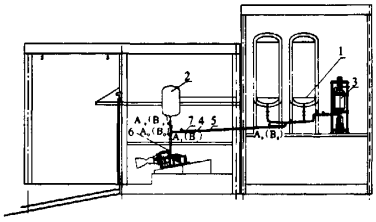
式中，L 为试车台贮箱至发动机入口管道长度，m；A 为试车台贮箱至发动机入口管道通径面积，m^2；M 为 L/A，由总体设计给定，m^{-1}。当 M 给定时，一是缩短管路长度，二是加大管路直径，以此为条件，进行试车台推进剂供应系统设计，达到减少系统流阻和惯性流阻的目的。

2.1 设计方案Ⅰ

起动容器与主容器接力试验系统设计方案。

(1) 系统设计方案

由试车台推进剂供应系统的主容器，提供发动机全程试车的推进剂，增设起动容器是为了保证发动机试车起动段起动平稳进入主级试车。起动容器设置在试车台前间靠近发动机位置，这样，缩短了起动容器与发动机入口之间管路的距离，如图 1 所示。



1-主容器；2-起动容器；3-流量校准装置；4-流量计；5-推进剂供应主管路；6-泵前推进剂管路；7-阀门

图 1 起动容器推进剂供应系统

Fig.1 Design of propellant supply system of starting tank

(2) 系统组成

该系统主要由主容器、起动容器、流量计校准装置、流量计、推进剂主管路、泵前管路、阀门、补偿器及管道组件等组成。

(3) 系统工作原理

发动机试验前，根据试验时间、秒流量计算推进剂加注量，给主容器加注推进剂。由主容器给流量校准装置容器加注推进剂，并采用高精度的流量校准装置，试前利用真实介质现场原位对流量计校准，以提高发动机试车时流量测量精度。试车前，打开阀门 A_6 (B_6)，进行主管道加注；打开起动容器隔离阀 A_{1b} (B_{1b})；打开阀门 A_{1a} (B_{1a}) 给起动容器加注；打开阀门 A_0 (B_0) 进行泵前管道加注。发动机试车时，程序控制打开发动机起动阀，开车 5~10s 时由起动容器系统供给发动机推进剂，程控打开阀门 A_{1a} (B_{1a})，接力由主容器系统供给发动机试车推进剂。

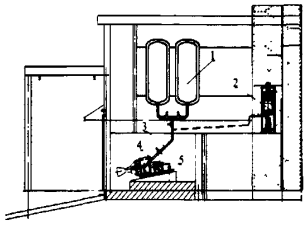
2.2 设计方案Ⅱ

取消起动容器，主容器前移系统设计方案。

(1) 系统设计方案

取消起动容器，主容器设计在发动机顶部平台上，达到缩短推进剂供应管路的目的。利用真实介质现场原位对流量计校准，以提高发动机试车时的流量测量精度，如图 2 所示。

万方数据



1-主容器；2-流量校准装置；3-流量计；
4-推进剂供应主管路；5-阀门

图 2 推进剂容器设计在发动机顶部平台方案

Fig.2 Design of propellant tank on the engine top platform

(2) 系统组成

该系统主要由主容器、流量计校准装置、流量计、推进剂主管路、泵前管路、阀门、补偿器及管道组件等组成。

(3) 系统工作原理

同方案 I。

2.3 设计方案Ⅲ

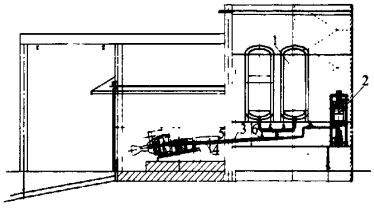
工作原理同方案 I，取消起动容器，增大主管路通径，并将主容器适当前移。

(1) 系统设计方案

此方案缩短了推进剂供应管路。为了保证流量测量精度，应在额定流量测量范围内选定流量计，流量计安装段管路的通径应与流量计通经相同，如图 3 所示。

(2) 系统组成

该系统主要由主容器、流量计校准装置、流量计、推进剂主管路、泵前管路、阀门、补偿器及管道组件等组成。



1-主容器；2-流量校准装置；3-流量计；
4-推进剂供应主管路；5-泵前推进剂管路；6-阀门

图 3 增大推进剂供应管道方案

Fig.3 Proposal of enlarging propellant supply pipe

3 发动机泵前入口压力设计计算

在系统设计方案确定后，按公式 (2)计算发动机试车台推进剂泵前入口压力，根据计算结果，分析设计的试车台起动试验系统，是否满足设计任务书提出的入口压力要求。

$$p_{in0}=p_{t0}+\rho gh\times10^{-3}-\Delta p_r-\Delta p_m \tag{2}$$

式中，p_{in0}为发动机起动入口压力，MPa；p_{t0}为试车台贮箱压力，MPa；g 为重力加速度，m/s²；h 为发动机入口至容器最高液面的静液柱高度，m；ρ 为推进剂密度，kg/m³。Δp_r为试车台管路静压损失，MPa。Δp_m为试车台管路动压损失，MPa。

3.1 试车台贮箱压力计算

3.1.1 发动机试车起动段试车台推进剂贮箱压力

$$p_{t0}=p+\Delta p_r+\Delta p_m-\rho gh\times10^{-3} \tag{3}$$

3.1.2 发动机试车稳定段试车台推进剂贮箱压力

$$p_t=p_{in}+\Delta p_r-\rho gh\times10^{-3} \tag{4}$$

式中，p_{in}为任务书要求的发动机最高入口压力，MPa；

3.2 试车台管路系统流阻静压损失的计算

静压损失按下式计算

$$\Delta p_r=\Delta p_f+\Delta p_j \tag{5}$$

式中，Δp_f为沿程阻力损失，MPa；Δp_j为局部阻力损失，MPa。

3.2.1 管路的沿程阻力损失计算

$$\Delta p_f=\Sigma\lambda\frac{l}{d}\frac{v^2}{2}\times10^{-3} \tag{6}$$

式中，λ 为液流摩擦阻力系数；l 为推进剂管路长度，m；v 为管道的平均流速，m/s。

液流摩擦阻力系数 λ 按下式计算

$$\lambda=\left(1.74+2\log\frac{r}{e}\right)^{-2} \tag{7}$$

式中，r 为试车台管道半径，mm；e 为管道绝对粗糙度，mm。管道选材 0Cr18Ni10Ti，对于新的焊接不锈钢管，无缝钢管的管壁绝对粗糙度为 0.1~0.2mm，计算取 0.15mm。

将求出的 λ 值，代入公式 (3)，计算出主管

万方数据

路的沿程损失 。

3.2.2 管路局部阻力损失

$$\Delta p_j=\Sigma\xi\rho\frac{v^2}{2}\times10^{-3} \qquad (8)$$

式中，ξ 为局部阻力系数。表 1 列出的是部分管道设备的局部阻力系数。

表 1 局部阻力系数表

Tab.1 Local drag coefficient

名 称	范 围 /ξ
截止阀	6~8
涡轮流量计	4~6
过滤器	6~8
波纹管	3~6
90°弯头	0.1~0.2
圆滑口	0.05~0.08

根据上表和系统设计中的截止阀、涡轮流量计、过滤器等管道设备的数量，将求出管道系统的 ξ 值代入公式（8），计算出管道的局部阻力损失。

3.3 系统动压损失计算

$$\Delta p_m=\Sigma\frac{L}{A}\frac{dQ}{dt}\times10^{-6} \qquad (9)$$

$\frac{dQ}{dt}$ 的值可以按涡轮泵联试起动过程的数据选取，也可以按照发动机在 70s 内流量达到额定值估算。

4 方案论证

4.1 方案Ⅰ——起动容器与主容器接力试验系统设计方案

根据设计提出的发动机建台任务书要求，在发动机入口附近设置起动容器，起动容器容积：氧化剂不低于 2.0m³，燃料不低于 1.0m³。经过和设计人员商定起动容器至发动机液氧/煤油入口管线通径分别为 $\Phi125$ 和 $\Phi100$，长度 $L\leqslant6$m。

按照这一要求，根据国内外建台型式和设计使用经验，新台建设设计了发动机起动容器系统。该系统管路从试车间发动机对接面开始，经过渡架、试车架、负推力补偿器，垂直向上至 +4.5m 平台上的主切断活门，与设置在试车架两侧+4.5m 平台上的起动容器下隔离活门和从主容器下通来的主管道上的隔离活门相连接，组成发动机起动容器系统。

该方案便于试车台总体布局且结构设计比较合理。但是，增设了起动容器，系统构成相应复杂，试车当天除了主管道加注预冷，还要给起动容器加注、预冷，试车前不但要给主容器增压而且还要给起动容器增压，工艺、控制程序较为复杂。更重要的是起动容器先工作，主容器何时接替工作以及如何保证接替过程中的压力平稳，是该方案的核心。

4.2 方案Ⅱ——取消起动容器，主容器前移系统设计方案

适当调整容器间和试车间平面布局。把试车间和容器间（二层）+5m 以上之间的隔墙，前移至试车架顶部所在平面。由于容器间在试车架上方，缩短了管道长度，为主容器和管道布置提供了有利条件。

从发动机入口管道对接面开始，经过渡架、负推力补偿器、试车架，由负推力补偿器接口斜上方，与+4.5m 平面标高主切断直角截止阀相接，通往容器间。敷设的推进剂主管路安装有补偿器、过滤器、流量计应急活门补偿器、容器隔离活门与液氧和煤油主容器相连。液氧和煤油主管路从主容器出来，至应急活门补偿器前，该段液氧和煤油管径相同。

该方案整体布局显得比较零乱，试车间空间较小。特别是要在 6m 长的主管道安装流量计，流量计的入口和出口段无法保证，只能依靠流量校验系统试前校准流量计，但该方案简化了试车台系统构成和试车工艺程序。

4.3 方案Ⅲ——取消起动容器，增大主管路通径，主容器适当前移系统设计方案

根据已确定的试车架和容器间位置，尽可能缩短从发动机入口到容器的距离，以满足发动机试验起动的需求。

该方案从发动机入口管道对接面开始，经过渡架、试车架,液氧管路和煤油管路分别从试车架水平引出，与主切断直角截止阀连通，截止阀中

万方数据

心线与液氧和煤油主管路中心线同轴。从主切断活门开始，液氧和煤油到容器间的主管路与地面夹角成 3°坡度，敷设推进剂主管路，并安装有补偿器、过滤器、流量计、应急活门、容器隔离活门与液氧和煤油主容器相连。

该方案简化了试车台系统构成和试车工艺程序。但由于设计任务书提出的发动机安装轴线与地面成 10°夹角，试车台容器间底下的辅助间就要设计成半地下型式，带来了通风、采光等问题。

综上所述，三种方案各有优缺点，而且国内外也都有相似类型的建台型式。由于目前总体设计还没有确定箭体推进剂贮箱到发动机入口管路长度，因而公式（1）中的 M 值还未能确定，目前建台设计只能和发动机设计人员初步商定，假设起动容器至发动机入口管线长度 $L \leqslant 6$m，以此条件，Ⅰ、Ⅲ方案的计算结果见表 2。

表 2　Ⅰ、Ⅲ方案计算结果

Tab.2　Calculation results of proposal Ⅰ、Ⅲ

	液氧系统		煤油系统	
	方案 I	方案 III	方案 I	方案 III
L/cm	600	1000	600	1000
d/cm	12.5	20	10	15
A/cm^2	122.7	314	78.50	176.63
M/cm^{-1}	4.89	3.18	7.64	5.66

从计算结果来看，二种方案都能够达到设计要求，经过论证评审，认为方案可行。在建台或改造设计时，要根据发动机建台任务书的设计要求，综合考虑选用种建台型式，便于总体合理布局设计，保证试车台的设计的质量，提高试车台的安全性、可靠性和合理性。

5 结论

借鉴某液氧/煤油发动机改台设计的成功经验，经过多次试车已掌握了起动容器和主容器接力技术，最终选定设计方案Ⅰ，即起动容器与主容器接力试验系统作为新建台的设计方案。另外两种方案，可以作为以后建台和改台的依据。

参考文献：

[1] 曾源华, 张政. 液体火箭发动机试验[M]. 宇航出版社, 1990.

[2] 机械工程手册[M]. 机械工业出版社, 1982, (2).

[3] 马瀚英.访苏考察纪要[J]. 国外航天推进试验技术. 1992, (2): 6-9.

[4] 夏兆熊. 西德和意大利火箭发动机地面试验技术介绍[J]. 国外航天推进试验技术. 1992, (1): 20-29.

[5] 李伟民. 液氧/煤油发动机试验起动过程推进剂供应技术[J]. 火箭推进, 2006, 32(3): 56-62.

[6] 程磊. 液氧/煤油发动机换热器试车台配气系统设计[J]. 火箭推进. 2006, 32(5): 60-62.

（编辑：王建喜）

万方数据