

## 某发动机并联贮箱排放均衡性研究

李纯飞, 龙春伟, 董 苑

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:**某发动机系统采用两台并联布局的贮箱供应推进剂, 推进剂排放存在不均衡, 其排放均衡性与发动机管路流阻特性、推力装置工作特性、发动机结构布局有关。为获得影响该发动机系统排放均衡性的主导因素, 并为改善系统排放均衡性提供依据, 建立了分析模型, 搭建了试验系统, 计算分析与试验验证了上述因素影响情况。计算及试验结果表明, 发动机管路流阻特性、发动机结构布局为主导因素, 对系统排放均衡性影响较大, 推力装置工作特性影响很小。据此, 提出了可行的改进措施, 包括控制发动机管路流阻特性和优化发动机结构布局。

**关键词:**液体发动机; 均衡排放; 并联贮箱; 分析模型; 改进措施

中图分类号: V433-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374(2018)03-0076-05

## Research on equalizing discharge of parallel tank for a liquid rocket engine

LI Chunfei, LONG Chunwei, DONG Yuan

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

**Abstract:** Two parallel tanks are arranged to supply propellant simultaneously in a liquid rocket engine, but the propellant discharge is not balanced. It is associated with the flow resistance of the engine pipeline, the thruster working performance and the structural layout of the engine. In order to obtain the dominate factors affecting the discharge balance of the engine system and provide the measure for eliminating the unequal discharge of the parallel tank, an analysis model and a testing system were established to verify the influence of these above factors through the computational analysis and test. The results show that the pipeline flow resistance and the structural layout of the engine are the main factors, while the influence of the thruster working performance is very small. Accordingly, the feasible improvement measures are achieved to control the pipeline flow resistance and optimize the structural layout of the engine.

**Keywords:** liquid rocket engine; equalizing discharge; parallel-tank; analysis model; improvement measure

收稿日期: 2017-02-07; 修回日期: 2017-06-26

基金项目: 国家 863 项目 (2015AA7060210)

作者简介: 李纯飞 (1986—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机总体

## 0 引言

某单组元发动机系统配套两台贮箱供应推进剂,两台贮箱采用并联方式布局,接入环形管路将推进剂分配至各推力装置,贮箱与推力装置布局结构如图1所示。系统工作时,两贮箱推进剂供应量不会完全一致,导致贮箱内推进剂排放不均衡,严重时其中一台贮箱推进剂耗尽而另一台贮箱剩余大量推进剂,会影响系统工作性能和可靠性,同时引起飞行器质心偏移,影响控制精度。经梳理,发动机管路流阻特性(连接贮箱与环管管路流阻大小及偏差)、推力装置工作特性(如推力装置喷注压力、床流阻、分解效率的各异性)、发动机结构布局(分布均匀性)等因素影响系统排放均衡性。为定量获得各影响因素进而为系统采取控制措施提供依据,建立了计算模型,对各影响因素进行了计算分析,搭建了试验验证系统。

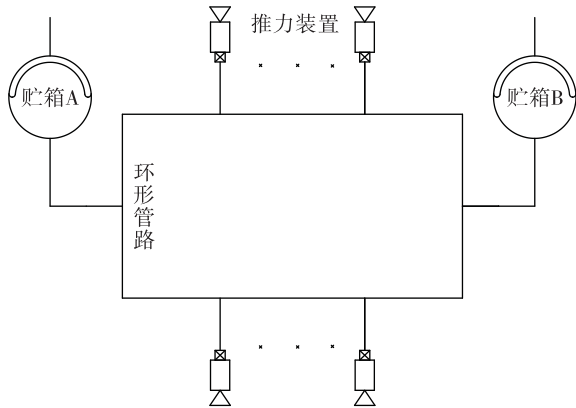


图1 贮箱并联布局示意图

Fig.1 Layout diagram of parallel tank

## 1 影响因素分析

### 1.1 分析模型

以两台推力装置同时工作为例,建立了如图2所示分析模型,图2中:A,B为两贮箱;F1,F2为两台推力装置; $q_A, q_B$ 为两贮箱流量; $q_{A1}, q_{A2}$ 为A贮箱供应的推进剂经环管分流后供应给两台推力装置的流量; $q_{B1}, q_{B2}$ 为B贮箱供应的推进剂经环管分流后供应给两台推力装置的流量; $q_1, q_2$ 为两台推力装置的流量; $p_{er}$ 为贮箱入口增压压力(采用同一减压

阀供应气体,因此假设两贮箱入口压力相等); $p_A$ 为A贮箱对应环管入口压力; $p_B$ 为B贮箱对应环管入口压力; $p_1, p_2$ 为两台推力装置入口压力。

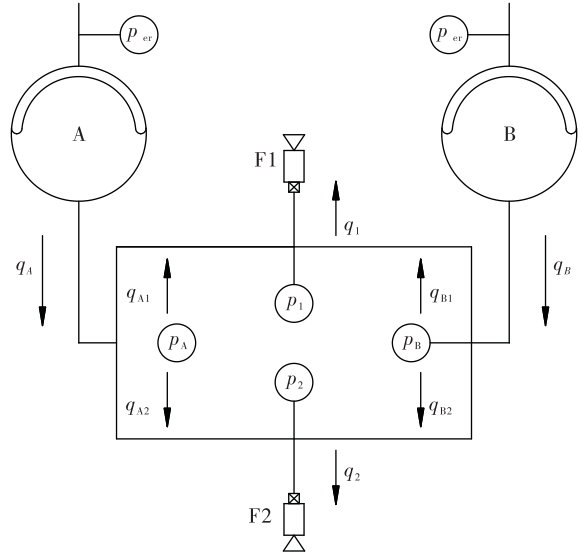


图2 模型示意图

Fig.2 Diagram of analysis model

系统工作时,推力装置推进剂供应遵循压力平衡和流量平衡,以图2所示系统为例,可建立如下压力平衡和流量平衡方程组:

$$p_{er} = p_1 + (p_A - p_1) + (p_{er} - p_A) \quad (1)$$

$$p_{er} = p_2 + (p_A - p_2) + (p_{er} - p_A) \quad (2)$$

$$p_{er} = p_1 + (p_B - p_1) + (p_{er} - p_B) \quad (3)$$

$$p_{er} = p_2 + (p_B - p_2) + (p_{er} - p_B) \quad (4)$$

$$q_A = q_{A1} + q_{A2} \quad (5)$$

$$q_B = q_{B1} + q_{B2} \quad (6)$$

$$q_1 = q_{A1} + q_{B1} \quad (7)$$

$$q_2 = q_{A2} + q_{B2} \quad (8)$$

对于推进剂供应系统,推进剂增压压力即 $p_{er}$ 为已知,贮箱与管路系统流阻特性通过液流试验或计算模型计算获得,流阻特性可拟合为流量的一元关系式;发动机入口压力与流量关系通过热试车获得,为此,推进剂供应压力平衡方程式(1)~(4)可转化为与流量相关的方程组,见式(9)~(12),结合系统流量平衡方程式(5)~(8),通过迭代计算,即可实现系统流量求取,进而可获得两贮箱供应流量并定量分析对排放均衡性的影响:

$$p_{er} = f_{q1} + f_{qA1} + f_{qA} \quad (9)$$

$$p_{er} = f_{q1} + f_{qA2} + f_{qA}$$

(10)

$$p_{er} = f_{q1} + f_{qB1} + f_{qB}$$

(11)

$$p_{er} = f_{q1} + f_{qB2} + f_{qB}$$

(12)

1.2 计算步骤

对管路流阻特性、推力装置工作特性、发动机结构布局等影响因素进行了计算。

管路流阻特性影响计算时重点计算了连接贮箱与环管管路流阻大小、流阻偏差对系统排放均衡性的影响,流阻大小变化通过改变管路通径获得,流阻偏差通过调节管路流阻相关系数获得。

推力装置工作特性影响计算时通过改变入口压力与流量拟合关系式,实现不同推力装置工作特性模拟,计算了工作特性无差异以及工作特性存在差异两状态对系统排放均衡性的影响。

发动机结构布局影响计算时对发动机与贮箱

对称布局状态和非对称布局两状态下系统供应特性进行了计算。

1.3 结算结果

计算了3种系统状态(系统状态1,2,3),8种工作模式(组合A,B,C,D,E,F,G,H)下系统供应特性。系统状态描述见表1。8种工作模式均为4机同时工作,组合A中发动机推力品种、推力装置工作特性相同,布局相同,贮箱对称布局;组合C,E,G三种工作模式推力品种相同、推力装置工作特性相同,结构布局不同,贮箱为非对称布局;组合B相对组合A,组合D相对组合C,组合F相对组合E以及组合H相对组合G除靠近A贮箱两台推力装置工作特性不同外,其余状态相同;组合B,D,F,H中靠近A贮箱两台发动机在设计入口压力下流量为设计值的1.1倍。计算结果见表1。

表 1 系统状态及计算结果  
Tab.1 System conditions and calculated results

系统状态	状态描述	工作模式	A 贮箱流量	B 贮箱流量	A,B 贮箱排液偏差
1	连接 A,B 贮箱与环管两管路流阻特性取为设计状态,两管路流阻特性相等	组合 A	15.352	15.3558	0.0%
		组合 B	15.363 0	15.294 6	+0.1%
		组合 C	10.447 1	10.346 3	+1.0%
		组合 D	10.453 7	10.339 9	+1.1%
		组合 E	10.156 4	10.595 9	-4.1%
		组合 F	10.163 4	10.586 0	-4.0%
		组合 G	10.616 6	10.177 9	+4.3%
		组合 H	10.621 2	10.173 5	+4.4%
2	连接 A 贮箱与环管管路流阻特性增加至设计状态的 1.2 倍,连接 B 贮箱与环管管路流阻特性取为设计状态	组合 A	14.819 7	16.012 5	-7.5%
		组合 C	10.040 2	10.773 7	-6.9%
		组合 E	9.794 96	11.027 2	-11.2%
		组合 G	10.205 3	10.615 8	-3.9%
3	连接 A,B 贮箱与环管两管路相对设计状态通径减小 20%,两管路流阻特性相等	组合 A	14.921 5	14.921 5	0.0%
		组合 C	10.296 4	10.262 1	+0.3%
		组合 E	10.213 2	10.364 6	-1.5%
		组合 G	10.361 4	10.21	+1.5%

1.4 计算结果分析

1.4.1 发动机管路流阻特性影响分析

对比系统状态1与2,状态1连接A,B贮箱与环管两管路流阻特性相同,均为设计状态,状态2两

管路流阻存在偏差,连接A贮箱管路流阻较设计状态偏大20%,连接B贮箱管路流阻为设计状态。A,C,E,G四种工作组合在状态1下两贮箱排液偏差分别为0.0%,+1.0%,-4.1%,+4.3%,在状态2

下两贮箱排液偏差分别为  $-7.5\%$ 、 $-6.9\%$ 、 $-11.2\%$ 、 $-3.9\%$ ,两状态下4种工作组合两贮箱排液偏差值增加  $7.1\% \sim 8.2\%$ ,变化较大,表明连接A、B两贮箱与环管管路的流阻偏差对系统排放均衡性影响较大。对比状态1与2四种工作组合计算结果,两管路流阻相等时,系统排放具有较好的均衡性。

对比系统状态1与3,状态1连接A、B贮箱与环管两管路通径为设计状态,状态3两管路通径较设计状态减小了20%,相应的阻尼效应增强。根据计算结果,A、C、E、G四种工作组合在状态3下两贮箱排液偏差分别为  $0.0\%$ 、 $+0.3\%$ 、 $-1.5\%$ 、 $+1.5\%$ ,相比于状态1,除对组合A排液偏差无影响外,组合B、C、D排液偏差均减小,减小  $0.7\% \sim 2.8\%$ ,变化较大,表明连接A、B两贮箱与环管管路的流阻大小对系统排放均衡性影响较大。对比状态1与3四种工作组合计算结果,增加两管路设计流阻有利于提高系统排放均衡性。

#### 1.4.2 推力装置工作特性影响分析

组合B、D、F及H中靠近A贮箱的两台推力装置工作特性相对设计状态存在变化,在设计入口压力下,其流量取为设计流量的1.1倍。根据计算结果,上述4种组合在状态1下两贮箱排液偏差分别为  $0.1\%$ 、 $+1.1\%$ 、 $-4.0\%$ 及 $+4.4\%$ ,对比A、C、E、G四种工作组合,各组合两贮箱排液偏差值增加约  $0.1\%$ ,相对推力装置工作特性变化10%,两贮箱排液偏差值变化较小,表明推力装置工作特性对系统排放均衡性影响有限。

#### 1.4.3 发动机结构布局影响分析

组合C、E、G推力装置品种及数量相同,结构布局不同,对比3种工作组合在3种计算状态下计算结果,各计算状态下,3种工作组合两贮箱排液偏差不同,最大相差  $3.0\% \sim 8.4\%$ 不等,表明发动机结构布局对系统排放均衡性影响较大。组合A发动机布局相对两贮箱对称,总体而言,在各计算状态下,组合A下两贮箱排液偏差较小,表明发动机宜设计为对称布局方案,以改善系统排放均衡性。

根据计算分析表明,影响本发动机系统排放均衡性的主导因素有连接贮箱与环管入口管路流阻

大小与偏差、发动机结构布局,推力装置工作特性影响有限。

## 2 试验及分析

### 2.1 试验方案

搭建冷态试验系统,将其介质供应流量-压降特性与发动机推进剂供应系统流量-压降特性设计一致,即可实现对发动机系统推进剂供应过程模拟,所建立的试验系统排放均衡性与发动机系统相当。试验系统进行冷态排液试验,获得各工作模式下系统排放特性,进而可对各影响因素影响情况进行试验验证。

试验时各工作模式逐一进行试验,各工作模式单独进行一定时长的排液,通过获得试验排液零秒及排液末秒两贮箱质量,即可获得各工作模式下两贮箱排液量及偏差情况,进而获得各影响因素影响情况。

试验选取了两种试验状态(试验状态1、2)、5种工作模式(组合U、V、W、X、Y)。试验状态描述见表2。组合U、V推力品种、数量、布局相同,推力装置工作特性不同,组合U为设计状态,组合V中靠近B贮箱的两台发动机在设计入口压力下流量为设计状态的1.2倍,另外两台靠近A贮箱的发动机为设计状态;组合W、X推力品种、数量与工作特性相同,布局不同。试验结果见表2。

### 2.2 试验分析

#### 2.2.1 发动机管路流阻特性影响分析

对比试验状态1与2,试验状态2连接贮箱与环管管路在设计状态基础上设置了节流孔板,流阻增加。组合U、V、W及Y均在两状态下进行了试验,根据试验结果,4种组合在试验状态1下两贮箱排液偏差分别为  $+1.4\%$ 、 $+0.4\%$ 、 $+10.2\%$ 及 $+18.4\%$ ,在试验状态2下分别为  $+0.4\%$ 、 $-0.5\%$ 、 $+3.6\%$ 及 $+7.5\%$ 。由于组合U、V排放均衡性相对较好,在两试验状态下变化不明显;组合W、Y排放均衡性相对较差,两组合在试验状态2下排放均衡性提高明显,相对试验状态1偏差分别减小  $6.6\%$ 、 $10.9\%$ ,表明增加连接贮箱与环管管路的流阻特性有利于提高系统排放均衡性。

表 2 试验状态与试验结果  
Tab. 2 Test conditions and results

试验状态	状态描述	工作模式	A 贮箱排液量	B 贮箱排液量	A,B 贮箱排液偏差
1	连接 A,B 贮箱与环管两管路 为设计状态,两管路未设置节 流孔板	U	19.246	18.999	+1.4%
		V	21.593	21.508	+0.4%
		W	11.223	10.192	+10.2%
		X	10.525	10.644	-1.2%
		Y	14.531	12.275	+18.4%
2	连接 A,B 贮箱与环管两管路 在设计状态基础上设置了节流 孔板	U	18.895	18.830	+0.4%
		V	21.206	21.300	-0.5%
		W	10.788	10.423	+3.6%
		Y	13.940	12.976	+7.5%

2.2.2 推力装置工作特性影响分析

组合 U 与 V 除推力装置工作特性不同外,其余状态均相同,其中组合 V 中两台靠近 B 贮箱的发动机在设计入口压力下流量为设计状态的 1.2 倍。根据试验结果,两组合在试验状态 1 下两贮箱排液偏差分别为 +1.4%、+0.4%,相差 1%,相对推力装置工作特性存在 20% 变化,排液偏差变化很小,表明推力装置工作特性变化对系统排放均衡性的影响有限。

2.2.3 发动机结构布局影响分析

组合 W 与 X 除发动机结构布局不同外,其余状态均相同。组合 W 在试验状态 1 下两贮箱排液偏差为 +10.2%,组合 X 在试验状态 1 下两贮箱排液偏差为 -1.2%,两组合下系统排液偏差相差 11.4%,表明发动机结构布局对系统排放均衡性具有较大影响。

根据试验结果,影响本发动机系统排放均衡性的主导因素有连接贮箱与环管入口管路流阻大小、发动机结构布局,推力装置工作特性影响有限。

3 控制措施

仿真分析和试验验证结果表明,连接贮箱与环管入口管路流阻大小与偏差、发动机结构布局对系统排放均衡性影响较大,推力装置工作特性影响有限。

可采取的控制措施:

1) 在连接贮箱与环管入口管路设置一定压差的限流结构或适当减小连接贮箱与环管入口管路

的通畅,增加管路阻尼效应。

2) 对连接贮箱与环管入口管路进行液流试验,通过选配产品进而消除或降低两管路流阻差异。

3) 发动机相对两贮箱对称布局;将发动机接口设置于远离两贮箱的环管中部位置,或在环管中部设置转接通集中安装各发动机分机,以降低不对称性影响。

4 结束语

对影响发动机贮箱推进剂排放均衡性的主要因素,进行了计算分析与试验,计算与试验结果表明,连接贮箱至环管的管路流阻大小、两管路流阻偏差、各推力装置相对两贮箱布局是否对称对发动机系统排放均衡性具有较大影响,推力装置工作特性影响有限,在此基础上,提出了可行的控制措施。

参考文献:

[1] 章玉华. 推进系统并联贮箱均衡排放性能及其控制措施[J]. 火箭推进, 2013, 39(3): 83-88.  
ZHANG Yuhua. Equalizing expulsion and control of parallel tanks in propulsion system [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(3): 83-88.  
[2] 魏彦祥, 赵京. 用于并联金属膜片贮箱均衡排放的一种控制方法[J]. 火箭推进, 2012, 38(5): 37-40.  
WEI Yanxiang, ZHAO Jing. Control method for equal expulsion of parallel metallic diaphragm tanks [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(5): 37-40.

(上接第 80 页)

- [3] 陈朝,黄敏超. 空间轨道转移飞行器推进系统静态仿真分析[J]. 火箭推进,2007,33(6):22-26.  
CHEN Zhao, HUANG Minchao. Static state simulation study of orbital transfer vehicle propulsion system [J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(6): 22-26.
- [4] 刘锋,周进. 金属膜片贮箱推进剂消耗不平衡分析[J]. 火箭推进,2006,32(5):28-33.  
LIU Feng, ZHOU Jin. Analysis of the unbalanced depletion of the propellant for the metal diaphragm tank [J]. Journal of rocket propulsion, 2006, 32(5): 28-33.
- [5] 陈宏玉,刘红军,刘上. 配置点谱方法求解推进剂供应管路瞬变流动[J]. 火箭推进,2013,39(4):24-29.  
CHEN Hongyu, LIU Hongjun, LIU Shang. Solution of

- transient flow in propellant pipelines by Chebyshev spectral collocation method [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(4): 24-29.
- [6] 王克昌. 液体火箭发动机瞬变过程的计算机模拟[J]. 宇航学报,1981,2(1):31-41.
- [7] 张黎辉,李家文,张雪梅,等. 航天器推进系统发动机动态特性研究[J]. 航空动力学报,2004,19(4):546-549.
- [8] 程谋森,刘昆,张育林. 推进剂供应管路内液体瞬变流一维有限元计算[J]. 推进技术,2000,21(4):12-15.
- [9] 钱海涵. 并联贮箱不平衡输出及其解决途径[J]. 上海航天,2000(1):8-11.
- [10] 何永森,舒适,蒋光彪,等. 管路内流体数值计算与仿真[M]. 湖南:湘潭大学出版社,2011.

(编辑:马 杰)