

# 金属膜片贮箱推进剂消耗不平衡分析

刘 锋, 周 进

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 分析了某型号推进系统金属膜片贮箱推进剂消耗不平衡问题, 建立了不平衡消耗的计算模型, 对地面排放试验和飞行时系统推进剂消耗不平衡量进行了计算。并通过地面试验对计算数据进行了比较。结果表明, 根据系统的静态计算模型, 给定影响因素偏差来确定推进剂消耗不平衡的计算方法正确、有效。

**关键词:** 推进系统; 金属膜片贮箱; 消耗不平衡

中图分类号: V421

文献标识码: A

文章编号: (2006) 05-0028-04

## Analysis of the unbalanced depletion of the propellant for the metal diaphragm tank

Liu Feng, Zhou Jin

(College of Astronautics and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** This paper analyzes the unbalanced depletion of the propellant for the metal diaphragm tank concerning a propulsion system, and founds the calculating model of the unbalanced depletion. The calculated result shows a good agreement with the experiment.

**Key words:** propulsion system; metal diaphragm tank; unbalanced depletion

### 1 引言

金属膜片贮箱推进剂消耗不平衡在双组元挤压式并联贮箱对称布置的推进系统中是需要关注

的重要问题<sup>[1]</sup>。由于对称布置的贮箱推进剂消耗不平衡导致航天器在飞行过程中质心不断的发生偏移, 可能会导致航天器偏离飞行轨道。为了纠正航天器飞行的偏离, 姿控发动机需要不断的工作, 过多地消耗推进剂, 使推进剂提前消耗完,

收稿日期: 2006-04-21; 修回日期: 2006-06-28。

作者简介: 刘锋 (1971—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 研究领域为液体火箭发动机系统设计。  
万方数据

严重的不平衡若超过姿控发动机的调姿能力后，无法对航天器进行控制，导致飞行失败。

## 2 金属膜片贮箱推进剂消耗不平衡的主要因素及分析方法

某型号推进系统采用挤压式统一推进输送系统，以四氧化二氮和甲基肼为推进剂，四只金属膜片贮箱对称布置，同种组元的两只金属膜片贮箱对称布置、并联输出。两路减压器对四只贮箱进行增压和挤压，一路减压阀独立挤压一只氧化剂贮箱和一只燃料贮箱，每只贮箱出口各由一只液路大流量电爆阀进行隔离，同种组元液路管路在液路大流量电爆阀后汇合，最后输送至双组元发动机。系统工作原理如图 1 所示。

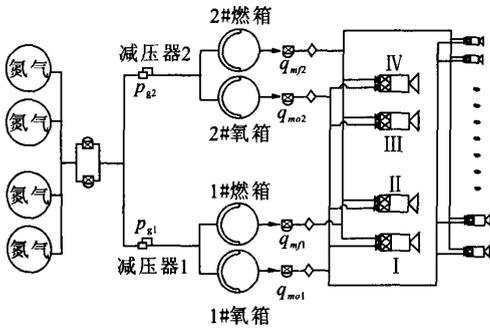


图 1 某型号推进系统原理图

Fig.1 The principle diagram of a propulsion system

$$P_{g1} = (k_{011} q_{m01} + k_{012} (q_{m01}^2 - q_{z0})^2 + k_{013} ((q_{m01} - q_{z0})/4)^2) / \rho_0 + k_c ((q_{m01} - q_{z0}) + (q_{m02} - q_{z0}) + (q_{m1} - q_{z1}) + (q_{m2} - q_{z2})) / 4 + \delta p_{m01} \quad (1)$$

对于 2# 氧化剂贮箱路压力平衡方程为：

$$P_{g2} = (k_{021} q_{m01} + k_{022} (q_{m02}^2 - q_{z0})^2 + k_{023} ((q_{m02} - q_{z0})/4)^2) / \rho_0 + k_c ((q_{m01} - q_{z0}) + (q_{m02} - q_{z0}) + (q_{m1} - q_{z1}) + (q_{m2} - q_{z2})) / 4 + \delta p_{m02} \quad (2)$$

对于 1# 燃烧剂贮箱路压力平衡方程为：

$$P_{g1} = (k_{111} q_{m01}^2 + k_{112} (q_{m1} - q_{z1})^2 + k_{113} ((q_{m1} - q_{z1})/4)^2) / \rho_f + k_c ((q_{m01} - q_{z0}) + (q_{m02} - q_{z0}) + (q_{m1} - q_{z1}) + (q_{m2} - q_{z2})) / 4 + \delta p_{m1} \quad (3)$$

对于 2# 燃烧剂贮箱路压力平衡方程为：

$$P_{g2} = (k_{121} q_{m01}^2 + k_{122} (q_{m2} - q_{z1})^2 + k_{123} ((q_{m2} - q_{z1})/4)^2) / \rho_f + k_c ((q_{m01} - q_{z0}) + (q_{m02} - q_{z0}) + (q_{m1} - q_{z1}) + (q_{m2} - q_{z2})) / 4 + \delta p_{m2} \quad (4)$$

对于 1# 氧化剂贮箱路压力平衡方程为：

其中，求解变量  $q_{m01}$ 、 $q_{m02}$ 、 $q_{m1}$ 、 $q_{m2}$  分别为 1# 氧箱、2# 氧箱、1# 燃料箱、2# 燃料箱的输出流量；

推进系统液路管路在铺设上采用对称布局，管路流阻对金属膜片贮箱推进剂消耗不平衡的影响可以忽略。因此，同种组元推进剂消耗不平衡主要由两路减压阀出口压力偏差和金属膜片贮箱膜片压差散布造成<sup>[2]</sup>。分析金属膜片贮箱推进剂消耗不平衡量的基本方法是根据系统的静态计算模型，给定影响因素的偏差，确定推进剂消耗全程中的消耗不平衡量。

## 2 计算模型

取四路贮箱中的一路进行分析。由于金属膜片前后的总压力平衡，建立系统压力平衡方程为：

减压器出口压力：

$$P_g = \delta p_m + \delta p_1 + \delta p_2 + \delta p_3 + P_c$$

式中， $\delta p_m$  为金属膜片压差。

贮箱出口管路流阻<sup>[3]</sup>：

$$\delta p_1 = k_1 q_m^2 / \rho$$

姿控管路分支后至轨控段管路流阻：

$$\delta p_2 = k_2 (q_m - q_z)^2 / \rho$$

轨控发动机进口管路流阻：

$$\delta p_3 = k_3 ((q_m - q_z) / 4)^2 / \rho$$

轨控发动机燃烧室压力：

$$P_c = k_c ((q_{m0} - q_{z0}) + (q_{m1} - q_{z1}) / 4)$$

$P_{g1}$ 、 $P_{g2}$  分别为减压阀 1、2 的出口压力；

$\delta p_{m01}$ 、 $\delta p_{m02}$ 、 $\delta p_{m1}$ 、 $\delta p_{m2}$  分别为 1# 氧箱、2# 氧箱、1# 燃料箱、2# 燃料箱的膜片压差；

$\rho_0$ 、 $\rho_f$  分别为氧化剂和燃料的密度；

$q_x$ 、 $q_{zo}$ 、 $q_d$  分别为姿控管路流量;

$k_{011}$ 、 $k_{012}$ 、 $k_{013}$ 、 $k_{021}$ 、 $k_{022}$ 、 $k_{023}$ 、 $k_{f11}$ 、 $k_{f12}$ 、

$k_{f13}$ 、 $k_{f21}$ 、 $k_{f22}$ 、 $k_{f23}$ 、 $k_c$  为通过试验确定的系数。

上述方程 (1) ~ (4) 给定一组  $p_{g1}$ 、 $p_{g2}$ 、 $\delta p_{m01}$ 、 $\delta p_{m02}$ 、 $\delta p_{mf1}$ 、 $\delta p_{mf2}$  输入数据, 即可计算出对应参数下的输出  $q_{m01}$ 、 $q_{m02}$ 、 $q_{mf1}$ 、 $q_{mf2}$ 。

### 3 计算结果及试验

#### 3.1 计算工况及计算结果

为了便于计算, 分别对贮箱膜片压差相对的减压器出口压差变化; 减压器出口压力、燃箱膜片压差相对的氧箱膜片压差偏差处于极限值; 减压器出口压力、氧化剂贮箱膜片压差相对的燃料贮箱膜片压差偏差处于极限值三种工况进行计算, 计算工况如表 1。

表 1 计算工况

Tab.1 Calculational conditions

工况	$p_{g1}$	$p_{g2}$	$\delta p_{m01}$	$\delta p_{m02}$	$\delta p_{mf1}$	$\delta p_{mf2}$
1	1.66	1.65	0.11	0.11	0.11	0.11
2	1.65	1.65	0.09	0.13	0.11	0.11
3	1.65	1.65	0.11	0.11	0.09	0.13

备注: 额定参数:  $p_{g1}=p_{g2}=1.65\text{MPa}$ ;

$\delta p_{m01}=\delta p_{m02}=\delta p_{mf1}=\delta p_{mf2}=0.11\text{MPa}$

第一种工况仅由两个减压器出口压力差引起的不平衡量的计算结果见图 2。

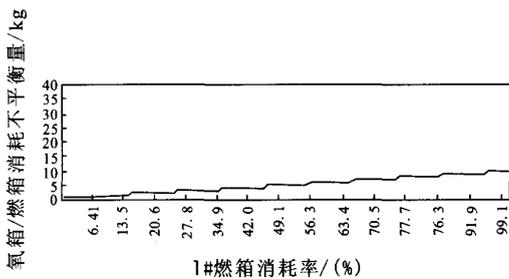


图 2 工况 1 下两氧化剂贮箱和燃料贮箱消耗不平衡量变化曲线

Fig.2 The unbalanced depletion variety curve of two oxidant tanks and fuel tanks under the first condition

第二种工况仅由两个氧化剂箱膜片压差引起的氧化剂不平衡量的计算结果见图 3。

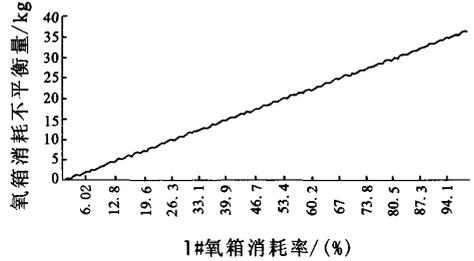


图 3 工况 2 下两氧化剂贮箱消耗不平衡量变化曲线  
Fig.3 The unbalanced depletion variety curve of two oxidant tanks under the second condition

第三种工况仅由两个燃烧剂箱膜片压差引起的燃烧剂不平衡量的计算结果见图 4。

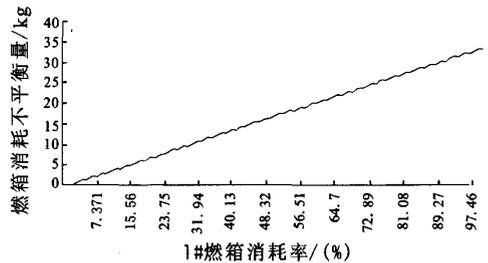


图 4 工况 3 下的两燃料贮箱消耗不平衡量变化曲线  
Fig.4 The unbalanced depletion variety curve of two fuel tanks under the third condition

金属膜片贮箱推进剂消耗不平衡计算结果: 将两减压器出口压力差不大于 0.01MPa, 对应两氧化剂贮箱和两燃料贮箱全程消耗不平衡量最大不超过 10.0kg, 同组元两氧化剂贮箱压差分别达到极限最小值和极限最大值 (1# 氧化剂贮箱压差最小, 2# 氧化剂贮箱压差最大), 两氧化剂贮箱全程消耗不平衡量最大不超过 37.0kg; 考虑同组元两燃料贮箱压差分别达到极限最小值和极限最大值 (1# 燃料贮箱压差最小, 2# 燃料贮箱压差最大): 两燃料贮箱全程消耗不平衡量最大不超过 35.0kg。

#### 3.2 贮箱不平衡排放试验

试验系统采用 4 只金属膜片贮箱, 其中 2 只贮箱有金属膜片, 另外 2 只为无金属膜片贮箱产品, 配对工作的每种组元分别有 1 只真实贮箱和 1 只无膜片贮箱, 以模拟同组贮箱膜片压差极限不同情况下对消耗不平衡的影响。

为模拟轨控发动机工作的背压，8台轨控发动机电磁机电磁阀后采用节流孔板模拟，以保证系统的工作压力和工作流量。调试参数按轨控分导发动机的入口压力和流量调试。

产品状态及试验系统参数：减压阀出口压力为1.65MPa(绝压)；轨控发动机氧化剂路电磁阀总压降为 $1.356\pm 0.015$ MPa；轨控发动机燃料路电磁阀总压降为 $1.366\pm 0.015$ MPa；试验程序设置6个工作段，每一段的工作时间设置约为30s，每个工作段的间隔时间为10s。试验数据见表2。

表2 试验数据

Tab.2 The experiment data

	1# 氧箱	2# 氧箱	1# 燃箱	2# 燃箱
总排放量/kg	89.337	109.544	88.195	70.101
两氧化剂贮箱总排放量/kg	198.881			
两燃料贮箱总排放量/kg			158.296	
不平衡排放量/kg	20.207		18.094	
不平衡排放量占同路排放量的百分比/%	10.2		11.4	

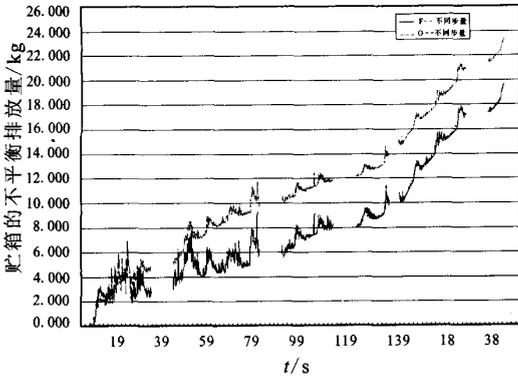


图5 贮箱的不平衡排放量

Fig.5 The unbalanced depletion of tanks

由于试验时同组元的两个金属膜片贮箱中一个无膜片，贮箱膜片压差偏差接近0.1MPa，氧化剂路最大不平衡量为51.15kg，贮箱膜片压差转换成最大0.04MPa后，排放不平衡量不超过24kg，见图5。试验过程中贮箱膜片的压差变化情况见图6，减压阀的变化情况见图7。

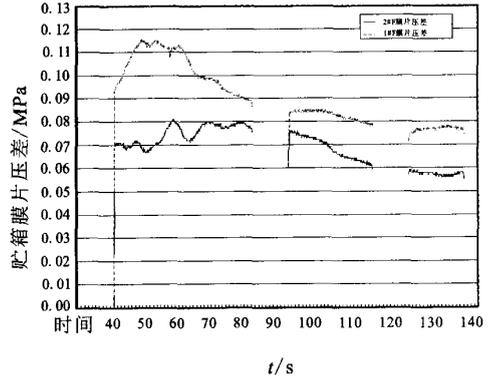


图6 贮箱膜片压差曲线

Fig.6 The differential pressure of tanks diaphragm

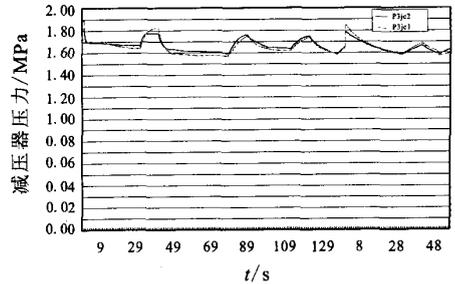


图7 减压器压力曲线

Fig.7 The pressure curve of the reductor

### 4 结论

地面试验金属膜片贮箱不平衡排放量与理论计算基本一致,说明分析方法正确。通过计算和试素,在进行金属膜片贮箱的膜片设计时需要控制膜片压差的散度。两个减压器出口压力的偏差是影响系统不平衡排放的另一个重要因素,在进行减压器出口压力调试时需要控制两个减压器出口压力的差值。

### 参考文献:

[1] 钱海涵. 并联贮箱不平衡输出及其解决途径[J]. 上海航天, 2000,(4):8-11.  
 [2] 朱智春, 赵和明, 罗斌. 金属膜片贮箱的膜片变形分析[J]. 推进技术, 1999,20(5):77-79.  
 [3] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.

(编辑: 侯 早)