

# 用于并联金属膜片贮箱均衡排放的一种控制方法

魏彦祥, 赵 京

(上海空间推进研究所, 上海 200233)

**摘 要:** 为控制并联金属膜片贮箱的均衡排放性能, 对并联金属膜片贮箱均衡排放的控制措施进行了理论分析和试验研究, 得出了一种能够有效控制并联金属膜片贮箱均衡排放的方法。本方法对使用并联金属膜片贮箱的推进系统具有借鉴意义。

**关键词:** 金属膜片贮箱; 均衡排放; 控制措施

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2012) 05-0037-05

## Control method for equal expulsion of parallel metallic diaphragm tanks

WEI Yan-xiang, ZHAO Jing

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** In order to control the equal expulsion of parallel metallic diaphragm tanks, theoretical analysis and experimental study on control measures for equal expulsion performance of parallel metallic diaphragm tanks were performed. An efficacious method to control the equal expulsion of parallel metallic diaphragm tanks was achieved. It provided an important reference to propulsion systems using parallel metallic diaphragm tanks.

**Keywords:** metallic diaphragm tank; equal expulsion; control measure

## 0 引言

为提高承载能力, 目前大型静止轨道卫星、飞船、深空探测器等航天器普遍采用四贮箱两两并联的布局构型: 两个氧化剂贮箱并联, 两个燃料贮箱并联。航天器工作过程中, 相同组元两个并联贮箱内的推进剂消耗质量会存在差异, 这个差异称为并联贮箱排放不均衡量。并联贮箱的排

放不均衡会引起航天器的质心变化, 超差时会影响航天器的正常工作, 严重时甚至能导致航天器失控翻转, 因此并联贮箱的排放不均衡量一直是推进系统的一个重要技术指标。并联金属膜片贮箱的排放不均衡量既与并联的两个金属膜片贮箱本身的金属膜片压差性能差异有关, 也与推进系统的管路流阻特性有关。

本文主要研究并联金属膜片贮箱均衡排放的控制措施, 探讨并联金属膜片贮箱均衡排放的分

收稿日期: 2011-10-26; 修回日期: 2012-02-23

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目 (2006JY12)

作者简介: 魏彦祥 (1974—), 男, 硕士, 研究领域为航空宇航推进理论与工程

析评定和试验验证方法,并通过试验验证并联金属膜片贮箱均衡排放的控制措施。

## 1 并联金属膜片贮箱均衡排放试验方案

### 1.1 试验系统配置

并联金属膜片贮箱的均衡排放性能,需要通过地面试验来验证。并联贮箱均衡排放试验采用全系统配置,充分考虑贮箱性能差异和管路布局不同对并联均衡排放的影响。

### 1.2 试验称重方案

采用全系统配置进行并联贮箱均衡排放试验,能够真实模拟推进系统工作过程中两个并联贮箱内推进剂(模拟工质)的消耗过程,但是怎样实时、准确地测量两个贮箱内推进剂的质量却比较困难。如果直接在贮箱出口安装流量计,也能实时测出贮箱的流量,但是破坏了推进系统的管路特性,系统管路走向和流阻发生了变化,试验结果不能反映真实产品的性能。如果采用非接触式流量计,系统管路的流阻特性没变,但是流量计的精度不能满足试验要求。推进系统的贮箱通常安装在星体的主承力结构上,采用电子秤无法直接测量贮箱内推进剂的质量。如果不用星体结构、贮箱直接放在电子秤上,也能实时测出贮箱内推进剂的质量,但是管路走向、布局无法保证,试验结果也不能反映真实产品的性能。

本文以采用并联金属膜片贮箱布局构型的一个推进系统为例,探讨并联金属膜片贮箱均衡排放试验的设计和控制措施。该推进系统的贮箱安装构型见图 1,4 个贮箱(2 个并联氧化剂贮箱+2 个并联燃料贮箱)通过底端法兰安装在星体主结构上。

为实时、准确测量贮箱内推进剂的质量,仍采用星体结构来安装和固定贮箱、气瓶等组件和管路系统,但同时对星体结构进行改造,使电子秤能够直接测量单个贮箱的重量。把星体结构上连接贮箱安装法兰的部位切掉,使贮箱通过支撑座直接落在电子秤上,由电子秤支撑贮箱,试验系统的称重方法示意图见图 2。和贮箱连接的钛合

金管路对贮箱有刚性支撑作用,会使电子秤测量的重量不是贮箱的真实重量。为消除刚性管路对贮箱的支撑,可把与贮箱直接相连的管路改成软管,或者把与贮箱相连的所有管路紧固装置松开,使贮箱上下运动时管路不对贮箱产生牵引力。如果贮箱的连接管路采用软管,管路的走向难于固定,管路流阻与真实产品不同,所以试验采用松开管路紧固装置的方法来消除刚性管路对贮箱的牵引力。

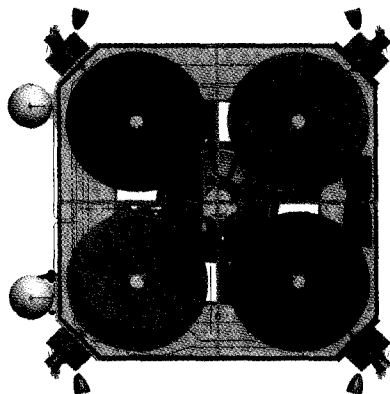


图 1 贮箱安装构型图

Fig. 1 Configuration of tanks

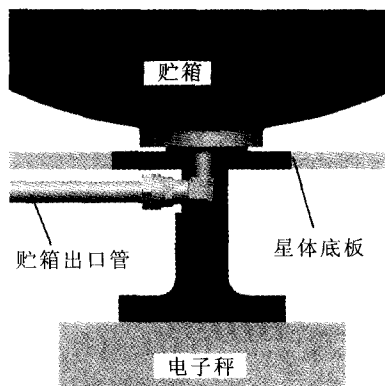


图 2 贮箱称重示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tank weighing

并联金属膜片贮箱的均衡排放试验,模拟了推进系统的真实工作过程,它通过 4 个电子秤,实时测量 4 个金属膜片贮箱内的推进剂(模拟工质)质量,得到并联金属膜片贮箱的并联排放不均衡量。

## 2 并联贮箱均衡排放试验的评定方法

地面试验用模拟工质代替真实推进剂,试验得到的不均衡量是模拟工质的质量。推进系统的技术指标是推进剂的不均衡量,推进剂的不均衡需要转换成模拟工质的质量,才能评价并联贮箱均衡排放试验是否满足要求。

并联贮箱不均衡量指标为3%,即两个并联贮箱在推进系统全程工作过程中贮箱内推进剂消耗质量的差异不超过单个贮箱加注量的3%,用公式表示如下:

$$\frac{(Q_1 - Q_2)t}{\frac{(Q_1 + Q_2)t}{2}} \leq 3\% \quad (1)$$

式中:  $Q_1$  为1#贮箱的推进剂质量流量;  $Q_2$  为2#贮箱的推进剂质量流量;  $t$  为排放推进剂的工作时间。

试验时使用去离子水作模拟工质,贮箱的推进剂质量流量与去离子水的质量流量的关系如下:

$$\frac{Q_1}{Q_{1\text{水}}} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{\text{水}}}} \quad \frac{Q_2}{Q_{2\text{水}}} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{\text{水}}}} \quad (2)$$

式中:  $Q_{1\text{水}}$  为1#贮箱去离子水质量流量;  $Q_{2\text{水}}$  为2#贮箱内去离子水质量流量;  $\rho$  为推进剂密度;  $\rho_{\text{水}}$  为去离子水密度。

把公式(2)中  $Q_1$  和  $Q_2$  关于  $Q_{1\text{水}}$ 、 $Q_{2\text{水}}$  的表达式代入公式(1),得到两并联贮箱水流量不同步的表达式:

$$(Q_{1\text{水}} - Q_{2\text{水}})t \leq 3\% \frac{(Q_1 + Q_2)t}{2} \sqrt{\frac{\rho_{\text{水}}}{\rho}} \quad (3)$$

上式  $t$  为排放推进剂的工作时间,需要把  $t$  转化为排放去离子水的时间  $t_{\text{水}}$ 。在公式(3)两边乘  $\frac{t_{\text{水}}}{t}$ ,得到试验过程两并联贮箱排放去离子水允许的不均衡质量:

$$(Q_{1\text{水}} - Q_{2\text{水}})t_{\text{水}} \leq 3\% \frac{(Q_1 + Q_2)t}{2} \sqrt{\frac{\rho_{\text{水}}}{\rho}} \frac{t_{\text{水}}}{t} \quad (4)$$

公式右边的  $3\% \frac{(Q_1 + Q_2)t}{2}$  是排放推进剂时并

联贮箱允许的不均衡质量;  $\frac{\rho_{\text{水}}}{\rho}$  是模拟工质与推

进剂的密度比;  $\frac{t_{\text{水}}}{t}$  是排放模拟工质与排放推进剂

的时间比。其中前两项可根据推进剂的加注量、试验介质密度直接计算,第三项的时间比需要换算。排放时间的计算公式如下:

$$t = \frac{M \cdot \eta}{Q_1 + Q_2}, \quad t_{\text{水}} = \frac{M_{\text{水}} \cdot \eta}{Q_{1\text{水}} + Q_{2\text{水}}} \quad (5)$$

式中:  $M$  为推进剂加注量(氧化剂加注1 619 kg,燃料加注981 kg);  $M_{\text{水}}$  为试验时去离子水的加注量(1 120 kg);  $\eta$  为贮箱排放效率。

由公式(4)和公式(5)算出氧化剂路并联贮箱允许的最大不均衡质量为16.8 kg,燃料路并联贮箱允许的最大不均衡质量为15.8 kg,用公式表示如下:

$$\text{氧化剂路: } (Q_{1\text{水}} - Q_{2\text{水}})t_{\text{水}} \leq 16.8 \text{ kg}$$

$$\text{燃料路: } (Q_{1\text{水}} - Q_{2\text{水}})t_{\text{水}} \leq 15.8 \text{ kg} \quad (6)$$

公式(6)的物理意义是:按照并联贮箱不均衡量3%的指标要求,地面用模拟工质试验时,两个并联氧化剂路贮箱的最大不均衡量不超过16.8 kg及两个并联燃料路贮箱的最大不均衡量不超过15.8 kg时,推进系统并联贮箱均衡排放满足技术指标要求。

## 3 并联金属膜片贮箱均衡排放试验和均衡排放控制措施研究

### 3.1 并联金属膜片贮箱均衡排放试验

按照上述试验方法,进行并联金属膜片贮箱均衡排放试验。试验采用全系统配置,安装四个金属膜片贮箱。试验过程氧化剂贮箱和燃料贮箱的重量变化见图3和图4,试验全程两个氧化剂贮箱并联排放最大不均衡量是29.1 kg,两个燃料贮箱并联排放最大不均衡量是13.5 kg。氧化剂路不均衡量超过了16.8 kg的指标要求,燃料路满足不超过15.8 kg的指标要求。

试验过程两个氧化剂贮箱的膜片压差散布不超过0.005 MPa,两个燃料贮箱膜片压差散布不超过0.003 MPa。氧化剂贮箱0.005 MPa的压

差散布会导致 7.8 kg 模拟工质的不均衡量, 燃料贮箱 0.003 MPa 的压差散布会导致 4.7 kg 模拟工质的不均衡量。并联金属膜片贮箱本身的性能差异导致的并联排放不均衡量约占不均衡量指标的 30%~46%, 不会造成并联贮箱均衡排放超差。因为影响并联贮箱均衡排放性能的两个主要因素是贮箱本身的性能差异和管路系统流阻, 所以两路氧化剂的管路系统流阻不平衡就是导致氧化剂路并联贮箱均衡排放超差的主要原因。

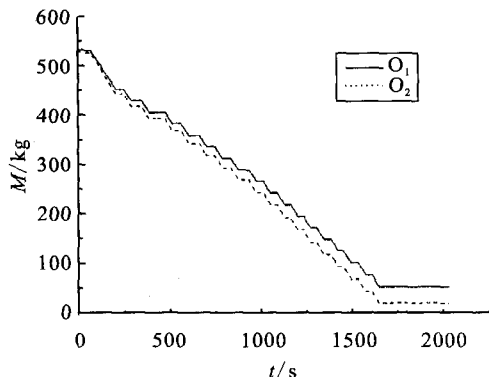


图3 并联氧化剂贮箱重量变化曲线

Fig. 3 Weight variation of parallel oxidizer tanks

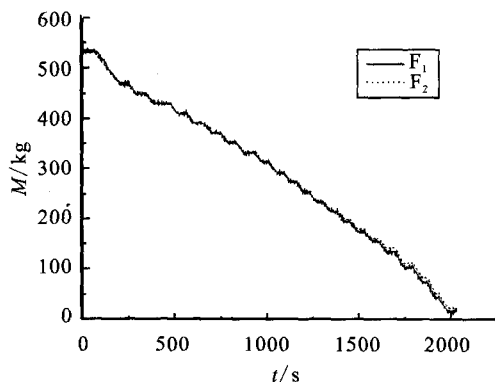


图4 并联燃料贮箱重量变化曲线

Fig. 4 Weight variation of parallel fuel tanks

## 3.2 并联金属膜片贮箱均衡排放控制措施研究

### 3.2.1 并联贮箱均衡排放超差原因的试验验证

并联金属膜片贮箱均衡排放试验结果氧化剂路贮箱并联均衡排放超差, 经理论分析认为超差是由管路系统流阻不平衡导致。为确认氧化剂路贮箱并联均衡排放超差的原因, 设计并进行了验证试验。氧化剂贮箱用两个相同空壳贮箱替换,

剥离贮箱性能差异对并联均衡排放的影响后进行氧化剂路的并联排放试验, 试验得到氧化剂贮箱的并联不均衡量为 23 kg。验证试验结果说明, 剥离贮箱本身性能差异的影响, 两路氧化剂管路系统流阻的差异已经导致贮箱的并联均衡排放指标超差, 证明了两路氧化剂管路系统流阻不平衡是导致氧化剂路贮箱并联均衡排放超差的原因。

因贮箱和主发动机氧化剂控制阀、燃料控制阀的空间布局位置限制, 试验系统的两路氧化剂管路长度和走向不同、两路燃料管路长度和走向基本相同, 试验系统的管路实际状态会导致两路氧化剂管路系统流阻不平衡, 与试验结果一致。

### 3.2.2 并联贮箱均衡排放控制措施研究

既然管路系统流阻不平衡是导致并联贮箱均衡排放超差的原因, 那么把管路系统流阻调平就是控制并联贮箱均衡排放的有效措施。燃料路贮箱的并联排放指标满足要求, 说明燃料路的两路流阻已经基本平衡, 只需把氧化剂路的两路流阻调平。

采取在流阻较小的氧化剂贮箱出口管路上增加节流环节的方法来增加流阻, 把氧化剂路的管路系统流阻调平后, 仍然用两个空壳贮箱进行并联氧化剂贮箱的均衡排放试验, 试验得到的氧化剂贮箱并联不均衡量为 10 kg。试验结果说明两路氧化剂管路系统的流阻已经基本调平, 管路系统的并联均衡排放结果由调节前的 23 kg 降低到调整后的 10 kg, 满足了指标要求。

### 3.2.3 实施控制措施后并联金属膜片贮箱均衡排放的试验验证

两路氧化剂路管路系统流阻调平后, 把两个氧化剂路的空壳贮箱更换为原来的金属膜片贮箱, 燃料贮箱仍使用原来的金属膜片贮箱, 采用四个金属膜片贮箱进行全系统的并联均衡排放试验, 用来验证采取控制措施后并联金属膜片贮箱的均衡排放性能是否满足技术指标要求。试验过程氧化剂贮箱和燃料贮箱的重量变化见图 5 和图 6, 试验结果两个并联氧化剂贮箱的最大不均衡量为 11.4 kg、两个并联燃料贮箱的最大不均衡量为 14 kg, 满足氧化剂路不超过 16.8 kg、燃料路不超过 15.8 kg 的指标要求。

验证试验结果说明,并联金属膜片贮箱的均衡排放控制措施有效,实施控制措施后,试验系统的金属膜片贮箱的并联排放不均衡量满足技术指标要求。

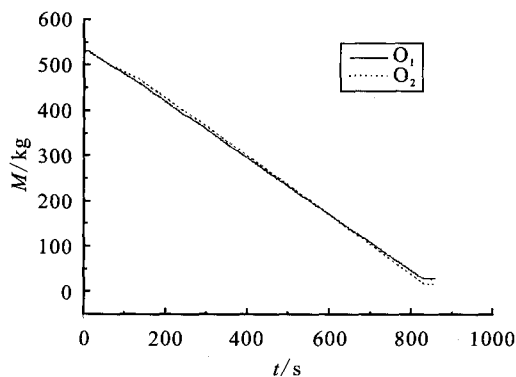


图5 实施控制措施后并联氧化剂贮箱重量变化曲线

Fig. 5 Weight variation of parallel oxidizer tanks after execution of control measure

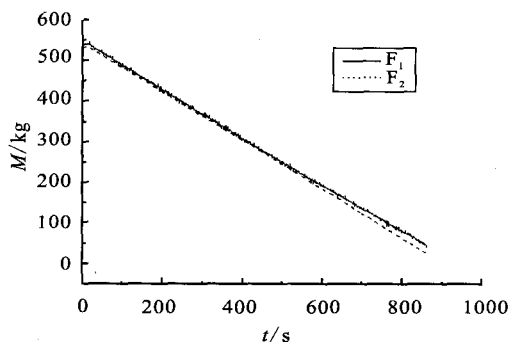


图6 实施控制措施后并联燃料贮箱重量变化曲线

Fig. 6 Weight variation of parallel fuel tanks after execution of control measure

## 4 结束语

对并联金属膜片贮箱的均衡排放控制措施展

开研究,设计了能够准确测量并联贮箱排放不同步量的试验方案,推导并建立了并联贮箱均衡排放试验的评定方法,针对具体算例进行了并联金属膜片贮箱的均衡排放试验,试验过程采取控制措施把金属膜片贮箱的并联排放不均衡量控制到了指标要求范围之内。

本研究得出的并联金属膜片贮箱均衡排放控制措施如下:

- 1) 推进分系统进行全系统水试,测出两路并联贮箱管路系统的流阻差异。
- 2) 采用孔板节流方法把管路系统的流阻调平。
- 3) 管路流阻系统调平后,通过全系统水试验证贮箱的均衡排放满足技术指标要求。
- 4) 固化管理路系统状态。

## 参考文献:

- [1] SUTTON George P, BIBLARZ Oscar. Rocket propulsion elements [M]. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [2] 郭霄峰,李耀华,陈鸿彦,等.液体火箭发动机试验[M].北京:宇航出版社,1990.
- [3] 朱宁昌.液体火箭发动机设计(上)[M].北京:宇航出版社,1994.
- [4] 朱宁昌.液体火箭发动机设计(下)[M].北京:宇航出版社,1994.
- [5] 刘国球.液体火箭发动机原理 [M].北京:宇航出版社,1993.
- [6] 赵兵.航天系统工程[M].北京:宇航出版社,2000.
- [7] 金朝铭.液压流体力学[M].北京:国防工业出版社,1994.

(编辑:王建喜)