

一种并联金属膜片贮箱均衡排放控制措施研究

张荣荣, 任 枫, 张 亮

(上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 航天器飞行过程中, 并联贮箱内同种推进剂排放不均衡会引起航天器的质心变化。为控制并联金属膜片贮箱的排放不均衡量, 对并联金属膜片贮箱均衡排放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措施, 采用该措施对某典型金属膜片贮箱不均衡量进行了理论计算。为验证并联金属膜片贮箱的均衡排放性能, 根据金属膜片的选配原则选取金属膜片进行地面试验验证, 并将理论计算结果与试验结果进行比对, 结果表明, 并联金属膜片贮箱不均衡量计算及控制措施正确、有效。

关键词: 并联金属膜片贮箱; 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 (2015) 06-0035-06

Research on control measures for equal expulsion of propellant in paralleled metal diaphragm tank

ZHANG Rongrong, REN Feng, ZHANG Liang

(Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: In the flight process of spacecrafts, the unequal expulsion of same type propellant in the parallel metal diaphragm tank will lead to the variation of the spacecraft centroid. In order to control the expulsion disequilibrium of parallel metal diaphragm tanks, the theoretical analysis and experimental research on control measures for the equal expulsion of parallel metal diaphragm tank were performed. An efficacious measure to control the equal expulsion of parallel metal diaphragm tanks was achieved. The theoretical calculation for expulsion disequilibrium of a typical metal diaphragm tank was carried out with this measure. To verify the unequal expulsion performance of the paralleled metal diaphragm tanks, a ground test was carried out, in which the metal diaphragms were selected according to the matching principles of the metal diaphragms. The theoretical results are compared with the results from the experiment. The comparison result shows that the calculation and control measures are feasible and effective.

Keywords: paralleled metal diaphragm tank; equal expulsion; control measure

收稿日期: 2015-05-05; 修回日期: 2015-07-08

作者简介: 张荣荣 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为增压输送系统设计

0 引言

为提高承载能力,目前国内外运载火箭三子级、上面级和航天器的输送系统多采用4个贮箱两两并联的布局构型,4个贮箱安装在同一平面上,2个氧化剂与2个燃料贮箱两两并联。如“MiTeX项目”上面级、“阿里安5”上面级、“Fregat”上面级、“第聂伯”火箭上面级、“AVUM”上面级、二代导航上面级、“阿波罗”载人登月飞船推进系统、“神舟”飞船推进系统等。飞行过程中,2个并联贮箱内同种推进剂消耗会存在差异,这个差异称为并联贮箱排放不均衡量,排放不均衡会引起航天器的质心变化,甚至会影响航天器的正常飞行。因此,并联贮箱的排放不均衡量一直是输送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2个金属膜片贮箱本身的金属膜片压差性能差异有关,也与增压输送系统的管路流阻特性和增压性能偏差有关。

某型三级运载火箭是我国新一代快速发射的液体运载火箭。三子级增压输送系统为泵压式双组元系统。由增压系统、推进剂贮存和输送系统及发动机组成。推进剂贮存和输送系统由4个180 L金属膜片贮箱及液路管路等组成,采用四氧化二氮和偏二甲肼作为推进剂。本文主要研究并联金属膜片贮箱均衡排放控制措施,探讨并联金属膜片贮箱均衡排放的分析评定和试验验证方法,并通过试验验证。

1 并联金属膜片贮箱不均衡性评定方法

1.1 并联金属膜片贮箱输送不均衡性计算原理

并联贮箱推进剂输送不均衡量计算原理如下:

系统的过载为 g ;贮箱液面高度为 Z ,在两贮箱中分别表示为 H_1 和 H_2 ;贮箱内膜片液侧压力分别为 p_1 和 p_2 ;输送总管的入口压力为 p ;两贮箱出口到总管入口的管路压力损失分别为 Δp_1 和 Δp_2 ;两输送支管内的推进剂流速分别为 v_1 和 v_2 ;输送支管面积为 A 。根据伯努力方程:

$$Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constant} \quad (1)$$

得,贮箱1:

$$p_1 = -\rho g H_1 + p + \Delta p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (2)$$

贮箱2:

$$p_2 = -\rho g H_2 + p + \Delta p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (3)$$

$$p_2 - p_1 = -\rho g (H_2 - H_1) + \Delta p_2 - \Delta p_1 + \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (4)$$

其中管路压力损失

$$\Delta p_1 = \left(\lambda_1 \frac{l}{d} + \xi_1 \right) \frac{\rho v_1^2}{2} \quad (5)$$

$$\Delta p_2 = \left(\lambda_2 \frac{l}{d} + \xi_2 \right) \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (6)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为沿程损失系数; l 为管长; d 为管内径; ξ_1 和 ξ_2 为沿输送支管各种局部阻力系数总和。

沿程阻力损失和液面高度差形成的压差与其他项相比非常小,在计算中可进行忽略,根据此原则,式(5)和(6)可变为以下形式:

$$\Delta p_1 = \xi_1 \frac{\rho v_1^2}{2} \quad (7)$$

$$\Delta p_2 = \xi_2 \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (8)$$

将式(7)和(8)代入式(4),可得:

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (\xi_2 + 1) v_2^2 - \frac{1}{2} \rho (\xi_1 + 1) v_1^2 \quad (9)$$

根据发动机工作原理,发动机运行过程中,氧化剂和燃料流量保持恒定,因而2根输送支管中推进剂流量和为恒定值,即

$$\rho A v_1 + \rho A v_2 = \text{constant} \quad (10)$$

联立式(9)和(10)即可求解出输送支管的流速 v_1 和 v_2 。

再按下式对每一时刻的流量进行积分,即可得总输送不均衡量 ΔM

$$\Delta M = \Delta \rho \int_0^t (v_1 - v_2) dt \quad (11)$$

由式(9),(10)和(11)可知,对于直径恒定的并联贮箱输送管路,计算输送不均衡量需要知道

的参数有:①两并联贮箱液面压力差 p_2-p_1 , 在贮箱增压压力相同时, p_2-p_1 为贮箱膜片翻转压力偏差;②管路阻力系数 ξ_1 和 ξ_2 ;③时间 t 。

地面试验中用水代替真实推进剂, 试验得到的不均衡量是水的质量, 增压输送系统的技术指标是推进剂的不均衡量, 因此推进剂的不均衡量需转换成水的质量才能评价并联贮箱均衡排放试验是否满足要求。

将水作为试验工质后, 式(7)中的密度 ρ 发生变化, 为保证膜片翻转压力偏差 p_2-p_1 仍与实际推进剂工作状态一致, 需改变两输送支管的流速 v_1 和 v_2 , 即管路总流量 v 需发生变化, 变化时需令:

$$\rho_{\text{水}} v_{\text{水}}^2 = \rho_{\text{推进剂}} v_{\text{推进剂}}^2 \quad (12)$$

按式(10)对试验水流量模化计算, 结果见表 1。

表 1 水试验模化流量换算结果

Tab. 1 Modeling flow conversion result for water test

推进剂	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	推进剂流量 $/(kg \cdot s^{-1})$	水模化流量 $/(L \cdot s^{-1})$
UDMH	797	0.734 5	0.82
N_2O_4	1 458	1.425	1.18

推进剂输送不均衡量则按下式计算

$$\Delta M_{\text{推进剂}} = \frac{\Delta M_{\text{水}}}{\rho_{\text{水}}} \rho_{\text{推进剂}} \quad (13)$$

1.2 并联金属膜片贮箱输送不均衡性排放控制措施

针对并联贮箱推进剂输送不均衡量的计算分析结果, 影响推进剂输送不均衡性的主要因素及控制措施为:

1) 增压压力偏差

增压压力偏差采用同组元贮箱气枕连通的方法控制, 增压压力偏差很小, 可忽略不计。

2) 膜片的翻转压力偏差

膜片的翻转压力为膜片本身特性, 主要受膜片材料的机械性能和加工工艺影响。膜片材料的机械性能主要受材料的晶粒度、硬度及抗拉强度、伸长率等影响。对于同批次的材料, 如果忽略材料机械性能方面的差异, 那么膜片的翻转压力偏差受膜片加工工艺控制。由于膜片的压降值无法预先测量, 一般通过膜片的加工工艺过程控制厚度、硬度等重要参数, 通过一定的子样数来

获取膜片压降的分布规律。评价一个批次中膜片厚度分布的一致性高低, 主要考虑两个方面:

一是各高度带上膜片平均厚度偏差, 以一批次膜片的平均厚度作为基准, 计算每一片膜片相对于本批次膜片平均厚度的差值, 差值越大, 表明该膜片厚度偏离本批次膜片平均水平越大, 即该膜片厚度相对于本批次膜片平均水平的一致性越低。

二是同一高度带上膜片厚度分布的不均匀性, 即计算膜片在同一高度带上周向厚度的标准差, 标准差越大, 表明该膜片在同一高度带上周向厚度分布越不均匀, 即该膜片自身厚度分布的一致性越低。

膜片厚度相对均值偏差越小、相对标准差越小, 则该膜片相对于本批次膜片平均水平的一致性越高。选配的原则是选择同一批次中膜片厚度分布一致性高、膜片硬度无较大超差的膜片。

3) 管路流阻

管路的流阻可以通过理论计算和地面试验获取, 并通过节流圈来降低同种组元推进剂排放不均衡量。在总装管路布局时, 对液路输送管路设计时采用同种规格的导管, 对同组元贮箱输送管采用全对称设计原则, 减小管路流阻差异。

2 某典型金属膜片贮箱不均衡量计算

某型运载火箭三子级增压输送系统采用常温氦定压力增压, 4 个 180 L 金属膜片贮箱贮存推进剂。设计时, 在满足指标的前提下尽可能使系统简化且系统参数优化, 在通过试验获取并控制膜片翻转压力范围后, 增压输送系统采用压力调节器增压、液路导管对称布局、输送管路增加节流圈 3 项措施有效控制同种组元推进剂排放不均衡量。增压输送系统整个工作过程中, 假设贮箱膜片翻转压力 ≤ 0.1 MPa, 膜片翻转压力偏差平均值 ≤ 0.015 MPa, 进行算例分析, 当其中 1 个贮箱推进剂耗尽, 停止计算, 通过 2 个贮箱的推进剂差值计算不均衡量。

管路阻力损失包含有输送支管(含节流圈和电爆阀)阻力损失、液路过滤器阻力损失、输送总管阻力和动压损失, 氧燃输送支路额定条件下

(15 ℃, 氧流量 1.425 kg/s, 燃流量 0.7 345 kg/s) 的阻力设计范围分别为 0.055±0.002 MPa 和 0.05±0.002 MPa, 据此对输送支路阻力系数进行计算, 结果列于表 2。

表 2 输送支路阻力系数计算结果
Tab. 2 Calculation result of resistance coefficient for feeding line

参数	氧化剂	燃料
输送支路阻力系数	12.62~13.58	23.35~25.30

下面对不同翻转压力偏差下的不均衡量进行计算分析, 计算时同种推进剂两侧输送支路分别选取管路阻力系数上下限值。

额定流量 (氧 1.425 kg/s, 燃 0.7 345 kg/s) 和额定温度 (15 ℃) 下, 不同翻转压力偏差引起的推进剂输送不均衡量变化情况见图 1。

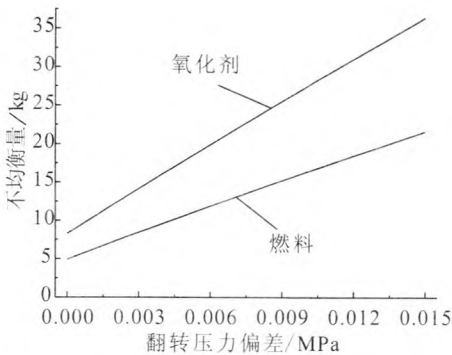


图 1 某典型金属膜片贮箱不均衡量计算结果
Fig. 1 Inequality calculation result for a certain type of metal diaphragm tank

可以看出, 随着翻转压力偏差的增大, 推进剂输送不均衡量增大。其中, 在 0.015 MPa 的最大翻转压力偏差下氧燃输送不均衡量分别为 35.3 kg 和 21.6 kg。同种组元推进剂排放不均衡量控制满足氧化剂不大于 36 kg, 燃料不大于 22 kg, 符合预期要求。

3 某典型金属膜片贮箱均衡排放试验方案

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。试验系统模拟整个三级氧箱和燃料箱的增压输送工况, 贮箱外形和尺寸与真实贮箱原则保持一致, 考虑膜片安装的方便性, 试验贮箱为 2 个半球法兰结构。增压系统模拟箭上真实状态, 贮箱初始气枕容积和初始增压压力与真实状态尽量一致; 输送系统由输送管、电磁阀、节流圈和手动蝶阀组成。在进行均衡输送性能试验时, 由于贮箱内金属膜片的翻转压力时刻变化, 将无法保证推进剂挤压压力的稳定。为保证推进剂输送流量的稳定, 试验采用了定流量的推进剂输送系统。定流量输送系统主要控制部件为螺杆泵, 通过转速的设定可确定管路出口流量, 泵的转速由变频电机进行调节。试验系统原理图如图 2 所示。

为了保证在额定流量下氧燃输送支路阻力达到设计要求 (氧 0.055±0.002 MPa, 燃 0.05±0.002 MPa), 须在输送支管上选配一定孔径的节流圈。因此, 在均衡排放试验前, 对配备不同孔径节流圈状态下的氧燃输送支管阻力系数进行了测试, 最后通过节流圈将氧燃输送支管流阻配平至设计要求值。

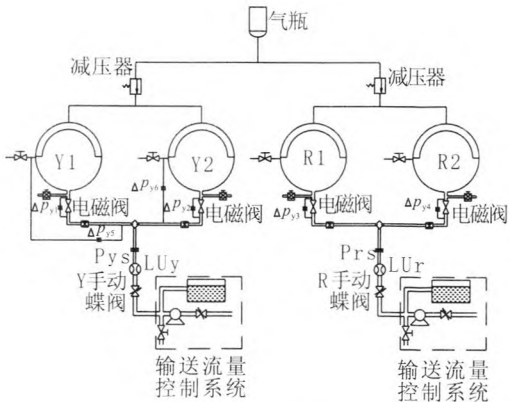


图 2 某典型金属膜片贮箱均衡排放试验系统原理图
Fig. 2 Principle diagram of equal expulsion test system for a certain type of metal diaphragm tank

3.1 金属膜片翻转压力偏差理论计算

根据金属膜片的选配原则, 实测同一批次 14 片膜片的厚度、表面硬度数据, 进行有限元分析计算, 得到膜片的翻转压力偏差, 如表 3 所示。

表 3 膜片翻转压力偏差

Tab. 3 Reverse pressure deviation of metal diaphragms

序号	翻转压力偏差/kPa
H20-H19	3.639
H16-H15	4.479
H12-H11	2.735
H10-H9	1.589
H8-H7	4.975
H6-H5	3.188
H4-H3	11.703
最大值	11.70
平均值	4.04
标准差	3.31

由表 3 可得:

- 1) 膜片翻转压力偏差的平均值为 4.04 kPa;
- 2) 根据正态分布理论, 则膜片翻转压力偏差有 99.73%的概率落在区间 (0, 13.99)。

根据金属膜片相关试验统筹安排, 某型号金属膜片贮箱均衡排放试验选取 H19 和 H20 进行试验, 根据 4 节不均衡量计算方法, 对翻转压力偏差为 0.003 64 MPa 的 2 片金属膜片在额定流量和额定温度下, 不均衡量为 3.76 kg。

3.2 某典型金属膜片贮箱均衡排放试验结果

根据计算结果, 可以发现在同样增压压力偏差下, 氧化剂输送不均衡量要大于燃料输送不均衡量。因此, 金属膜片均衡排放试验仅按照氧化剂状态的模化流量, 对氧化剂带膜片并联贮箱输送不均衡量进行测量。

实际试验流量约在 1.20 L/s, 与 1.18 L/s 的额定值较为接近, 因而试验数据可以反映实际状态输送管路阻力变化情况。从图 3 中输送管路阻力变化情况来看, 工作过程中贮箱液腔至汇总口两侧平均压差在 0.058 MPa, 去除动压影响后, 两侧输送支路平均流阻应在 0.054 MPa, 在要求的 0.055±0.002 MPa 范围内。

从图 4 和表 4 所得膜片特性来看, 该组 2 片膜片翻转趋势接近一致, 平均翻转压力不高于 0.05 MPa, 2 个膜片的平均翻转压力偏差在 0.003 5 MPa, 与金属膜片翻转压力偏差理论计算值一

致, 试验测得推进剂不均衡量为 2.87 kg, 与理论计算 3.76 kg 接近。

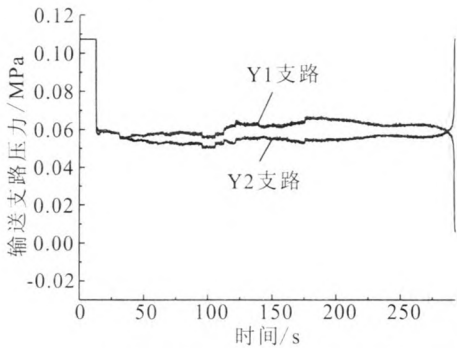


图 3 均衡排放试验输送管路压力变化情况

Fig. 3 Pressure change in feeding pipeline in equal expulsion test

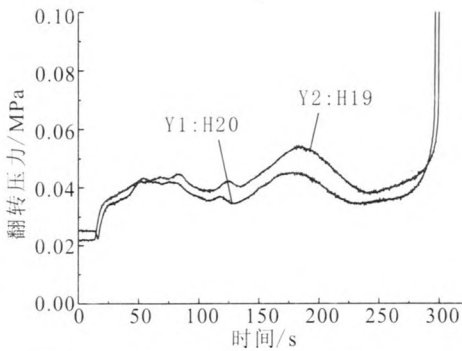


图 4 均衡排放试验膜片翻转压力变化情况

Fig. 4 Pressure changes of metal diaphragm in equal expulsion test

表 4 均衡排放试验膜片翻转特性

Tab. 4 Reversal features of metal diaphragm in equal expulsion test

膜片 编号	最大翻转 压力/MPa	平均翻转压 力/MPa	最大翻转压 力偏差/MPa	平均翻转 压力偏差/ MPa
H20	0.045 4	0.039 1	0.011 4	0.003 5
H19	0.054 76	0.042 7		
膜片 编号	水剩余量/ kg	换算推进剂 不均衡量/ kg	计算推进剂 不均衡量/ kg	
H20	5.55	2.87	3.76	
H19	7.52			

4 结 论

对某典型并联金属膜片贮箱的均衡排放控制方法展开研究,指导并建立了并联贮箱均衡排放试验的评定方法,设计了能够准确测量并联贮箱排放不均衡量的试验方案,并进行了均衡排放试验。试验结果与理论计算基本一致,说明分析方法正确。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内。

研究得出的并联金属膜片贮箱均衡排放控制措施如下:

- 1) 从系统原理设计及管路选择和布局来降低同种推进剂增压偏差;
- 2) 同种推进剂贮箱采用同规格输送管路并采用全对称布局,同时采用节流圈调节的方法把管路系统的流阻差异调至最小;
- 3) 提高金属膜片加工精度,控制膜片的加工工艺过程,控制厚度、硬度,降低金属膜片的翻转压力偏差。

参考文献:

- [1] GORLAND S. Development of a hemispherical metal diaphragm for single-cycle liquid systems, NASA TN D-2884[R]. Washington: NASA, 1965.
- [2] KAMMERER H, HUGHES J, GRIBBEN E. Analytical & material advances in contoured metal diaphragms for positive expulsion tanks, AIAA 95-2354[R]. Reston: AIAA, 1995.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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): 28-31.
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): 28-31.
- [6] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(上)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [7] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [8] 郭宵峰,李耀华,陈鸿彦. 液体火箭发动机试验 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1989.
- [9] 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.
- [10] 李亚裕. 液体推进剂[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [11] 朱志华,胡小平,陈香林. 钛制金属贮箱膜片的有限元分析[J]. 火箭推进, 2007, 33(4): 32-36.
ZHU Zhihua. HU Xiaoping. CHEN Xianglin. Finite element analysis of the overturning process of titanium diaphragm for propellant tank[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2007, 33(4): 32-36.
- [12] 张增亭. 金属膜片贮箱膜片的数值仿真与试验验证[J]. 火箭推进, 2009, 35(3): 26-29.
ZHANG Zengting. Numerical simulation and test verification of diaphragm for metal diaphragm tank [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(3): 26-29.

(编辑: 陈红霞)