

推进系统并联贮箱均衡排放性能及其控制措施

章玉华

(上海空间推进研究所, 上海 201112)

摘 要: 推进系统在工作过程中, 贮箱排放的不均衡性将引起飞行器质心偏移, 产生干扰力矩。对空间推进系统并联工作的金属膜片贮箱均衡排放的影响因素进行了分析, 结合均衡排放的控制措施对某型号推进系统工作过程中的排放不均衡量进行了预计, 并与飞行试验结果进行了比对。飞行试验结果表明控制措施可行、有效。

关键词: 金属膜片贮箱; 推进系统; 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 (2013) 03-0067-05

Equalizing expulsion and control of parallel tanks in propulsion system

ZHANG Yu-hua

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: The propellant tank is an important component of the space propulsion system. During the operation of the propulsion system, the unequal expulsion of the metallic diaphragm tanks will lead to the variation of the spacecraft centroid, which will result in interference moment. The factors which affect the equal expulsion of parallel metallic diaphragm tanks in the propulsion system are analysed. The unequal expulsion degree of a propulsion system is estimated in combination with the measures of controlling the expulsion. It is compared with the results of flight experiment. The results show that the control measure is feasible and effective.

Keywords: metallic diaphragm tank; propulsion system; equalizing expulsion; control measure

0 引言

国内外大型的上面级推进系统和空间推进系统多数采用 4 只贮箱并联布局的方式, 如“阿里安 5”上面级、“阿波罗”载人登月飞船推进系

统和“神舟”飞船推进舱推进系统等。

推进系统通常设置 2 只氧化剂贮箱和 2 只燃料贮箱, 同种组元的贮箱两两并联供应下游发动机工作所需推进剂。在推进系统工作期间, 由于并联的同种组元贮箱上下游压力存在偏差, 因此两路贮箱的输出流量不会完全一致, 导致贮箱内

收稿日期: 2012-07-12; 修回日期: 2012-12-04

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2009JY06)

作者简介: 章玉华 (1971—), 女, 高级工程师, 研究领域为空间推进系统设计

推进剂的排放不均衡,并因此导致飞行器飞行过程中质心产生偏移,对飞行产生干扰力矩。因此,并联贮箱均衡排放问题是推进系统研制过程中需要重点关注的内容。

1 某型号推进系统

某型号推进系统为氮气增压的恒压挤压式双组元系统,由增压系统、推进剂贮存和输送系统及发动机组成,系统原理图见图1。推进系统采用的推进剂为四氧化二氮和一甲基肼。

增压系统部分由钛合金气瓶、充气阀、气路

电爆阀、减压阀和气路管路等组成;推进剂贮存和输送系统部分由4个120 L金属膜片贮箱、液路电爆阀、加排阀及液路管路等组成;推进系统由24台发动机组成:4台轨控发动机(推力为2 500 N)、12台大姿控发动机(推力为150 N)和8台小姿控发动机(推力为25 N)。

某型号推进系统在研制过程中通过分析和计算,确定了均衡排放控制措施,先后完成了全系统液流试验、全系统地面热试车和飞行试验等多项大型试验,试验结果验证推进系统同种组元推进剂排放不均衡量控制在不大于30 kg指标范围内,达到了预计的目标。

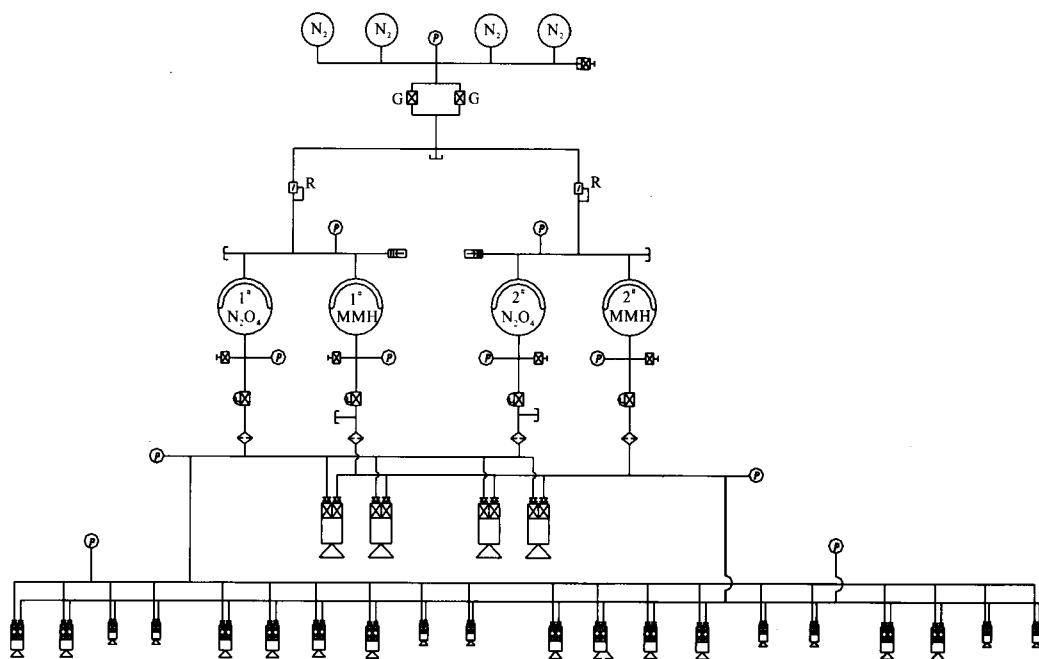


图1 某型号推进系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of propulsion system

2 并联贮箱工作特性

2.1 工作模型及理论分析

并联工作的同种组元贮箱见图2。图中 p_{g1} , p_{g2} 为1#贮箱气腔压力和2#贮箱气腔压力, MPa; p_{l1} , p_{l2} 为1#贮箱液腔压力和2#贮箱液腔压力, MPa; p_m 为并联贮箱出口汇合点处压力, MPa; Q_1 , Q_2 为1#贮箱排出推进剂的质量流量和2#贮箱排出推进剂的质量流量, kg/s。 $Q=Q_1+Q_2$ 为汇合后推进剂的质量流量, kg/s。

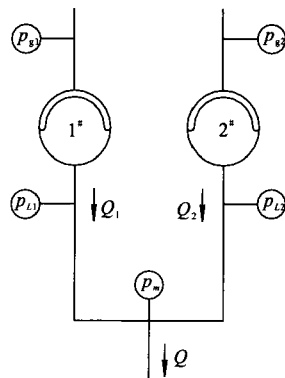


图2 并联工作的同种组元贮箱

Fig. 2 Model of parallel tanks with same propellant

并联贮箱输出的推进剂量和贮箱液腔压力与汇合点处压力之差有关，贮箱液侧压力可以表达为贮箱气腔压力（近似为减压阀出口压力）减去贮箱气腔至液腔的压降（以下简称贮箱压降）。因此两只并联贮箱输出流量的比值近似为

$$\gamma = \sqrt{\frac{p_{g1} - \Delta p_{m1} - p_m}{p_{g2} - \Delta p_{m2} - p_m}} \quad (1)$$

式中： Δp_{m1} 、 Δp_{m2} 为 1# 和 2# 贮箱压降，MPa。

由于并联工作的两只贮箱其贮箱压降可能出现不一致的现象，因此在某些推进系统设计时在贮箱出口设置孔板，通过孔板来实现对两路贮箱输出流量的调节，其模型见图 3，其输出流量的比值近似为

$$\gamma = \sqrt{\frac{p_{g1} - \Delta p_{m1} - \Delta p_{kb1} - p_m}{p_{g2} - \Delta p_{m2} - \Delta p_{kb2} - p_m}} \quad (2)$$

式中： Δp_{kb1} 、 Δp_{kb2} 分别为 1# 和 2# 贮箱出口孔板压降，MPa。

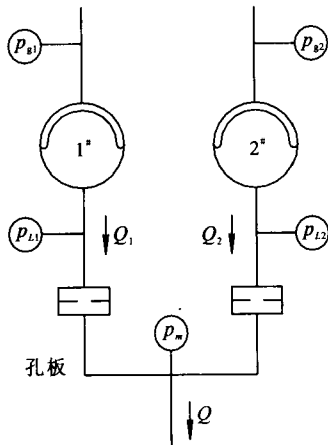


图 3 并联工作的贮箱 (采用孔板调节)

Fig. 3 Model of parallel tanks with throttle orifice

对于采用汽蚀管作为调节元件的系统，汽蚀管入口压力即为贮箱液侧压力，其模型见图 4。根据汽蚀管的特性，在汽蚀管下游管路压降一致的情况下，可以认为汇合点处的压力为推进剂的饱和蒸汽压，因此两只并联贮箱输出流量的比为

$$\gamma = \sqrt{\frac{p_{g1} - \Delta p_{m1} - p_s}{p_{g2} - \Delta p_{m2} - p_s}} \quad (3)$$

式中 p_s 为饱和蒸汽压。

由于推进剂的饱和蒸汽压值远低于系统的工作压力，如红色四氧化二氮 15℃ 时的饱和蒸汽压

为 75 kPa，绿色四氧化二氮 MON-1 在 15℃ 时的饱和蒸汽压为 90 kPa，一甲基肼在 25℃ 时的饱和蒸汽压为 6.6 kPa，推进系统工作压力一般在 1.5~2.0 MPa 之间，因此在贮箱出口设置汽蚀管后可大幅度降低不均衡量。

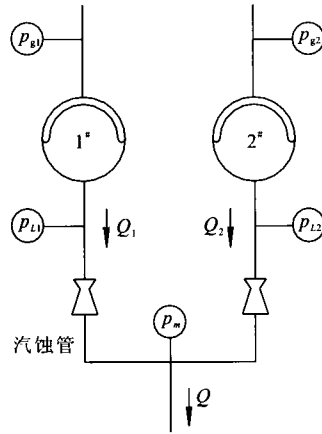


图 4 并联工作的贮箱 (采用汽蚀管调节)

Fig. 4 Model of parallel tanks adjusted by cavitation tube

2.2 影响因素分析

分析公式(1)、(2)和(3)，可知影响同种组元推进剂排放不均衡的主要因素是：

1) 贮箱气路进口压力的偏差

如推进系统采用两路减压阀分别给同种组元的两个贮箱供气，则减少两路减压阀出口压力的偏差即可降低气路进口压力的影响；推进系统如采用单个减压阀给两个贮箱供气，由于两个贮箱气路导管的规格一致，管路设计一般采用对称布局，因此气路进口压力偏差很小，可忽略不计。

2) 贮箱推进剂管理装置的压降

采用囊式贮箱或表面张力贮箱的推进系统，可进行仿真计算或通过液流试验预先测量实际压降；当两路贮箱的压降一致时，两路贮箱的输出流量是一致的。因此在贮箱出口设置孔板，通过调节两路孔板的压降，实现对已知的两贮箱压降的不一致性进行补偿，实现贮箱排放的均衡性。

采用金属膜片贮箱的推进系统，由于膜片的压降值目前无法预先测量，可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压降的散布规律后，同样可以采用两路孔板进行调节。

3) 贮箱出口系统管路至推进剂汇合处压降

系统管路的压降可以通过理论计算和液流试验来获取。

2.3 控制措施

针对影响同种组元推进剂排放不平衡的因素在设计和工程实施中可以采取以下的控制措施:

1) 在推进系统设计时尽量采用单个减压阀给同种组元两个贮箱供气。

由于受到研制进度、经费等因素制约,如图1所示,某型号推进系统采用了两路减压阀,在系统产品总装前,对两路减压阀必须进行配对调试,缩小减压阀出口压力的偏差,尽可能减小贮箱气路进口压力偏差带来的影响。

为提高系统的可靠性,某些推进系统往往会采用减压阀冗余设计,主备份减压阀也需进行配对调试,以减小由于减压阀出口压力的偏差对推进系统参数的影响。

2) 采用囊式贮箱或表面张力贮箱的推进系统,可以通过液流试验测量同种组元两贮箱的实际压降,通过贮箱出口的孔板调节两路贮箱的压降,有效控制并联贮箱的排放不均衡量。

3) 采用金属膜片贮箱的推进系统,通过控制金属膜片的厚度和硬度等参数可以将膜片压降控制在一定的范围内,并通过大量试验子样获取膜片压降的散布规律。

在后续金属膜片贮箱的研制工作中,逐步通过仿真、试验等手段实现金属膜片压降值的预计,同时开展膜片预先排放方面的研究工作,分析和验证预先排放对膜片压降、工作可靠性等性能的影响,摸索预先测量金属膜片工作过程中的压降的方法。

4) 在总装管路布局时,特别是贮箱出口液路导管走向设计采用同种规格导管、全对称设计原则,以减小管路压降的差异。

5) 通过液流试验测量和调节贮箱出口系统管路至推进剂汇合处的压降,使两路压降一致。

6) 在贮箱出口设置汽蚀管或节流孔板,降低同种组元推进剂排放不均衡量。

在某型号推进系统的设计和研制过程中,综合考虑指标要求、系统参数优化等,同时兼顾到

研制周期,控制同种组元推进剂排放不均衡量采用了上述两路减压阀配对调试、获取和控制膜片压降的散差、贮箱出口液路导管全对称设计等三项控制措施。

3 某型号推进系统不均衡量预计

3.1 贮箱出口无调节装置时不均衡量预计

某型号推进系统采用的是金属膜片贮箱,并联工作的同种组元贮箱不均衡量计算模型见图2。两贮箱采用单个贮箱等量定量加注方法。

设同种组元两贮箱的总流量为 $Q=100\text{ g/s}$,如两路贮箱特性完全一致,则单个贮箱的设计流量为 $Q_1=Q_2=50\text{ g/s}$ 。

在某型号推进系统中,配对调试的两减压阀出口允许偏差 0.01 MPa ,减压阀出口压力名义值为 1.63 MPa ,贮箱膜片压降按统计结果 $0.10\pm 0.02\text{ MPa}$ 的极限情况进行计算,即两贮箱的膜片压降分别为 0.12 MPa 和 0.08 MPa ,则根据公式(1)可得两贮箱输出流量的比值

$$Q_1'/Q_2'=\gamma=\sqrt{\frac{1.63-0.12-1.4}{1.64-0.08-1.4}}=0.829$$

式中: Q_1' 为 1# 贮箱实际排出推进剂的质量流量, g/s ; Q_2' 为 2# 贮箱实际排出推进剂的质量流量, g/s 。

因此,可知 $Q_1'=45.3\text{ g/s}$, $Q_2'=54.7\text{ g/s}$,即 1# 贮箱的实际流量相比设计值降低 9.3%, 2# 贮箱的实际流量增加 9.3%,系统不均衡量预计最大将达到单个贮箱加注量的 18.6%。

贮箱膜片压降控制在 $0.10\pm 0.015\text{ MPa}$ 范围时

$$Q_1'/Q_2'=\gamma=\sqrt{\frac{1.63-0.115-1.4}{1.64-0.085-1.4}}=0.861$$

因此, $Q_1'=46.3\text{ g/s}$, $Q_2'=53.7\text{ g/s}$, 1# 贮箱的实际流量降低 7.4%, 2# 贮箱的实际流量增加 7.4%,系统不均衡量预计最大将达到单个贮箱加注量的 14.8%。

从上述计算可以看出,在配对工作的减压阀工作特性相同的条件下,金属膜片贮箱的压降散布是影响排放不均衡量的主要因素。

由于目前金属膜片的实际压降不可测量,根

据某型号推进系统配套金属膜片贮箱的统计结果，两个贮箱的膜片压降的差值小于 0.04 MPa，因此在实际飞行试验中不平衡量应小于 18.6%。

3.2 采用孔板调节时不平衡量预计

在上述某型号推进系统中，选取贮箱压降分别为 0.12 和 0.08 的两个贮箱，在贮箱出口设置流阻为 0.2~0.24 MPa 的孔板，使两路贮箱的压降一致，同时相应减压阀出口压力名义值提高到 1.83 MPa，其余参数不变，进行计算，则根据公式(2)可得

$$Q_1'/Q_2'=\gamma=\sqrt{\frac{1.83-0.12-0.20-1.4}{1.84-0.08-0.24-1.4}}=0.957$$

因此， $Q_1'=48.9\text{ g/s}$ ； $Q_2'=51.1\text{ g/s}$ ；即 1# 贮箱的实际流量降低 2.2%，2# 贮箱的实际流量增加 2.2%。系统不平衡量预计最大将达到单个贮箱加注量的 4.4%，不平衡量下降明显。

3.3 采用汽蚀管调节时不平衡量预计

在上述某型号推进系统中，如在贮箱出口设置流阻为 0.2 MPa~0.24 MPa 的汽蚀管，同样将相应减压阀出口压力名义值提高到 1.83 MPa，饱和蒸汽压取甲基肼的值为 0.007 85，其余参数不变，进行计算，则根据公式(3)可得

$$Q_1'/Q_2'=\gamma=\sqrt{\frac{1.83-0.12-0.00785}{1.84-0.08-0.00785}}=0.985$$

因此， $Q_1'=49.6\text{ g/s}$ ， $Q_2'=50.4\text{ g/s}$ ，即 1# 贮箱的流量降低 0.8%，2# 贮箱增加 0.8%，系统不平衡量预计最大达单个贮箱加注量的 1.6%。

从上述预计中可见，推进系统不采取调节装置时，系统不平衡量预计最大为 18.6%；在已知膜片极限压降的条件下，采用孔板调节时，系统不平衡量预计最大为 4.4%；采用汽蚀管调节时，系统不平衡量预计最大为 1.6%。

因此，在推进系统中采用孔板或汽蚀管调节，可以大大降低并联贮箱的不平衡量，但在推进系统中设置孔板或汽蚀管（流阻一般为贮箱工作压力的 11%~15%）将增大了液路的流阻损失、提高贮箱和减压阀的工作压力，同时增加了用于贮箱增压的用气量。

4 某型号推进系统均衡排放试验结果

在某型号推进系统设计时，在满足指标要求的前提下尽可能使系统简化且系统参数优化。因此，在通过试验获取并控制膜片压降范围后，推进系统采用了配对调节减压阀、液路导管对称布局两项措施有效控制同种组元推进剂排放不平衡量。某型号推进系统大型试验中同种组元推进剂排放不平衡量见表 1。

表 1 并联贮箱排放不平衡试验结果

Tab. 1 Results of unequal expulsion of parallel tanks

名 称	两氧化剂贮箱排放不平衡质量/kg	单个氧化剂贮箱加注量/kg	氧化剂不平衡量/%	两燃料贮箱排放不平衡质量/kg	单个燃料贮箱加注量/kg	燃料不平衡量/%
第一次地面系统热试车	≤0.5	156	≤0.03	5.0	94	5.3
第二次地面系统热试车	2.0	165	1.2	7.5	100	7.5
第三次地面系统热试车	7.0	170.5	4.1	8.0	104	7.7
第一次飞行试验	11.9	170	7.0	1.0	104.5	1.0
第二次飞行试验	1.0	170.5	0.6	15.9	104	15.3
第三次飞行试验	10.95	170.5	6.4	1.46	104	1.4
最大不平衡量/%			15.3			

(下转第 78 页)

疲劳磨损和粘着磨损是产生多余物的重要原因。

在用 QFD 方法分析时,着重研究了如何避免滑动副的疲劳磨损和粘着磨损。将技术解决方案概括为三种思路,研究了其技术特点和适用范围。根据思路三,即采用降低滑动面接触应力的设计原则,进一步研究了滑动副要素的机械加工工艺规划和工序质量控制要点。

参考文献:

- [1] ADELMAN H M, HAFTKA R T. Sensitivity analysis of discrete structural systems[J]. AIAA Journal, 1986, 24(5): 823-832.
- [2] SMITH D E, SIDDHI V. Generalized approach for incorporating normalization conditions in design sensitivity analysis of eigenvectors [J]. AIAA Journal, 2006, 44(11): 2552-2561.
- [3] 宋曦,赵荣珍. 转子-轴承系统固有频率对设计参数的灵敏度[J]. 甘肃工业大学学报, 1999, 25(2): 37-40.
- [4] 张义民, 闻邦椿, 刘巧伶. 转子-机匣系统碰摩灵敏度研究[J]. 机械设计, 2002, 19(3): 9-10.

- [5] LEE T H. Adjoint method for design sensitivity analysis of multiple eigenvalues and associated eigenvectors[J]. AIAA Journal, 2007, 45(8): 1998-2004.
- [6] REN YX. Evaluation of the stability derivatives using the sensitivity equations[J]. AIAA Journal, 2008, 46(11): 912-917.
- [7] 史秋明. 直流电磁铁的动特性研究 [J]. 自动化仪表, 2007, 28(5): 20-23.
- [8] 秦现生. 并行工程的理论与方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [9] BEEK A Van. 现代机械工程设计--全寿命周期性能与可靠性[M]. 刘传军 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [10] 田明, 冯进良, 白素平, 等. 精密机械设计[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [11] 潘英朋, 高汉平, 刘刚. 磁性双位自锁电磁阀磁路设计与分析[C]//上海航天动力技术研究院. 2009 年中国航天第三专业信息网第 30 届技术交流会论文集. 上海: 上海航天动力技术研究院, 2009: 604-613.
- [12] 李松晶, 梁慧敏, 刘茂恺, 等. 采用极化电磁机构的节能电磁换向阀[J]. 机床与液压, 1997 (5): 5-6.
- [13] 瓦伦丁 L 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及应用 [M]. 李强, 雒建斌 译. 北京: 清华大学出版社, 2011.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 71 页)

表 1 中地面试验的不均衡量是试车结束后从贮箱向地面推进剂贮罐回排推进剂的量, 由于推进剂回排受地面管路系统和环境温度等影响, 结果误差较大。表 1 中飞行试验的不均衡量是根据试验末期膜片压降数据变化判读获取的, 当膜片压降值急剧增加时认为该贮箱内推进剂已排空。

分析表 1 的数据, 3 次飞行试验同种组元推进剂排放不均衡量最大为 15.3%, 与预计值 18.6%接近。推进系统最大不均衡量为 15.9 kg, 满足不大于 30 kg 的指标要求。

5 结束语

推进系统并联贮箱排放不均衡量与系统采用的增压方案和贮箱方案密切相关。采取不同的措施可以控制并联贮箱的均衡排放性能。某推进系

统采用配对调节减压阀、液路导管对称布局的措施有效控制了同种组元推进剂排放不均衡量。

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 (1): 8-11.
- [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]. 空间推进, 2011 (1): 5-8.
- [3] 陈杰, 陈志坚. 并联工作表面张力贮箱均衡排放问题研究[C]//卫星推进技术研讨会论文集. 杭州: [出版者不详], 2002: 75-81.
- [4] 李亚裕. 液体推进剂[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [5] SUTTON G P, BIBLARZ O. Rocket propulsion elements [M]. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [6] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.

(编辑: 陈红霞)