

捆绑火箭 POGO 振动动力学模型的研究

周星光^{1,2},孙冰²,翟师慧¹,汤杰¹

(1. 上海航天精密机械研究所,上海 201600; 2. 北京航空航天大学宇航学院,北京 100083)

摘要:确定了捆绑火箭 POGO 振动动力学模型中蓄压器的最佳安装位置,简化了液体捆绑火箭动力学模型。基于AMESim 软件搭建捆绑火箭动力学仿真模型,分析了蓄压器的安装位置对捆绑火箭 POGO 振动系统的系统阻尼比的影响,以及贮箱、直管、泵和推力室产生的作用力对系统阻尼比的影响。结果表明:蓄压器安装在芯级氧路和助推氧路的系统阻尼比提升最大,POGO 振动的抑制效果最好;推力室产生的作用力对系统阻尼比的影响占主导地位,故仅需考虑推力室产生的作用力,以简化捆绑火箭 POGO 振动动力学模型。该研究可应用于 POGO 振动的仿真过程。

关键词:捆绑火箭; POGO 振动; 蓄压器; 系统阻尼比; 作用力

中图分类号:V 421.1 文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.01.018

POGO Vibration Dynamic Model of Bundled Rocket

ZHOU Xingguang^{1,2}, SUN Bing², ZHAI Shihui¹, TANG Jie¹

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;

2. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The best installation position of the accumulator in the POGO vibration dynamic model of the bundled rocket is determined and the dynamic model of the liquid bundled rocket is simplified. The dynamic simulation model of the bundled rocket is established by AMESim software. The influence of accumulator's installation position on the damping ratio of bundled rocket's POGO vibration system and the influence of the force produced by the tank, the conveyor pipe, the pump and the thrust chamber on the damping ratio are analyzed. The results show that the damping ratio of the system with accumulators installed in the core oxygen circuit and the boost oxygen circuit is the highest, and the POGO vibration suppression effect is the best. The force produced by the thrust chamber plays a dominant role in terms of affecting the damping ratio of the system. The POGO vibration dynamic model of the bundled rocket can be simplified by only considering the force produced by the thrust chamber. The research can be applied in the simulation of POGO vibration.

Keywords: bundled rocket; POGO vibration; accumulator; system damping ratio; force

0 引言

POGO 振动是指液体火箭结构系统与推进系统相互耦合而产生的纵向不稳定振动,在低频振动中占有不可忽视的地位^[1]。POGO 振动不仅损害航天器自身的功能及设施,还会严重威胁宇航员的生命健康^[2-3]。因此,POGO 振动的抑制对于液体火箭的设计非常重要。

如今对 POGO 振动的研究众多,但研究模型大

多数是单组元模型或者是没有考虑耦合的双组元模型^[4-11],对液体捆绑火箭的 POGO 振动分析较少。文献[12]中给出了单组元模型中蓄压器的最佳设置位置,但未分析捆绑火箭模型。文献[13]中给出了火箭飞行过程中各部件产生的作用力,但未分析这些作用力对 POGO 振动的影响程度。

POGO 振动稳定性方法有许多种,但其实质都是一样的,即特征方程根的实部为负时,系统是稳定

的;否则是不稳定的。系统阻尼比为特征方程根的实部与系统特征频率的比值,则液体捆绑火箭 POGO 振动仿真模型的稳定性条件变为:如果系统阻尼比为正,则系统是稳定的;如果为负,则系统失稳。本文搭建了液体捆绑火箭动力学仿真模型,分析了蓄压器的位置对捆绑火箭 POGO 振动抑制效果的影响,以及各个部件处产生的作用力对捆绑火箭 POGO 振动的影响。

1 设计思路

通过 Rubin^[13]模型,考虑了助推段与芯级之间的耦合关系,搭建了双组元液体捆绑火箭动力学仿真模型。在捆绑火箭中,蓄压器可抑制 POGO 振动,但其安装方式共有 15 种。通过调整蓄压器的位置,分析火箭飞行过程中泵、贮箱、直管、推力室处产生的作用力对 POGO 振动的影响程度,来简化液体捆绑火箭 POGO 振动动力学模型。

2 液体捆绑火箭动力学模型的建立

参考文献[13]中贮箱、波纹管、直管、蓄压器、泵、推力室等部件的动力学方程,以及贮箱、直管、泵、推力室产生的作用力动力学方程,基于AMESim 建模软件的二次开发平台 AMESet,构建液体捆绑火箭推进系统的贮箱、波纹管、直管、蓄压器、泵、推力室等部件模块。

捆绑火箭的 POGO 耦合系统由氧路的耦合系统和燃料路的耦合系统组成,以氧路的耦合系统为例,如图 1 所示。

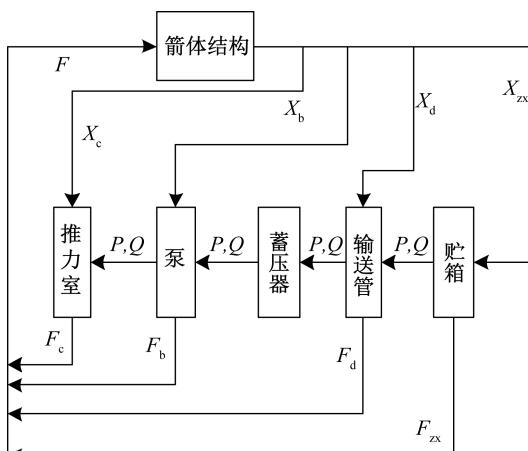


图 1 氧路耦合系统

Fig. 1 Oxygen circuit coupling system

图 1 中各部件之间通过脉动压力(P)和脉动流量(Q)相互联系。图中: v_c, v_b, v_d 和 v_{zx} 分别表示箭体结构在推力室、泵、直管、贮箱处反馈回来的纵向振动速度; F_c, F_b, F_d 和 F_{zx} 分别表示推力室、泵、直管、贮箱处产生的作用力。

在贮箱处产生的作用力

$$F_{zx} = Q_{zx} \frac{\beta}{\rho} - P_{zx} A_{zx} N_{zx} \quad (1)$$

式中: Q_{zx} 为贮箱处的脉动流量; β 为单位面积上的脉动压力; ρ 为推进剂的密度; P_{zx} 为贮箱处的脉动压力; A_{zx} 为贮箱的横截面积; N_{zx} 为贮箱处的模态参数。

在直管处产生的作用力

$$F_d = Q_d A_d R_d N_d + m_f (\ddot{r} N_d) N_d \quad (2)$$

式中: Q_d 为直管内的脉动流量; A_d 为直管的横截面积; R_d 为直管的阻力系数; N_d 为直管处的模态参数; m_f 为直管内的推进剂的质量; \ddot{r} 为直管的纵向振动加速度。

在泵处产生的作用力

$$F_b = P_{bi} A_{bi} N_{bi} - P_{bo} A_{bo} N_{bo} + \frac{2 W_s Q_{bo}}{\rho} \left(\frac{N_{bi}}{A_{bi}} - \frac{N_{bo}}{A_{bo}} \right) \quad (3)$$

式中: P_{bi}, P_{bo} 为泵入口和出口处的脉动压力; A_{bi}, A_{bo} 为泵入口和出口处的横截面积; N_{bi}, N_{bo} 为泵入口和出口处的模态参数; W_s 为稳态流量; Q_{bo} 为泵出口处的脉动流量。

在推力室处产生的作用力

$$F_c = -A_c C_f P_c N_c \quad (4)$$

式中: A_c 为推力室的喉部面积; C_f 为推力系数; P_c 为推力室内的压力; N_c 为推力室的模态参数。

在广义坐标系下描述箭体结构纵向振动的方程为

$$\mathbf{M}_i \ddot{q}_i + \mathbf{C}_i \dot{q}_i + \mathbf{K}_i q_i = \boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{F} = \mathbf{F}_i \quad (5)$$

式中: $\mathbf{M}_i, \mathbf{C}_i, \mathbf{K}_i, \boldsymbol{\phi}_i$ 分别为第 i 阶模态质量、阻尼、刚度和振型列阵; \mathbf{F}_i 为第 i 阶广义力。根据式(5),在 AMESet 中完成液体捆绑火箭结构系统模块的构建。芯级和助推器参数见表 1,捆绑火箭的纵向模态参数见表 2。

在此基础上,引入贮箱、直管、泵和推力室的纵向振动速度和加速度信号反馈,参考文献[12]中的蓄压器在单组元模型中的最佳位置,在 AMESim 中搭建了液体捆绑火箭动力学仿真模型,如图 2 所示。

表 1 芯级和助推器参数

Tab. 1 Level and booster parameters

| 参数名称 | 芯级 | 助推器 |
|---|-----------|-----------|
| 氧化剂密度/(kg·m ⁻³) | 1 458 | 1 458 |
| 氧化剂输送管的长度/m | 9.87 | 5.634 |
| 氧化剂输送管横截面积/m ² | 0.015 328 | 0.018 63 |
| 氧化剂泵的动态增益 | 2.5 | 2.5 |
| 氧化剂泵的阻力系数/(m ⁻¹ ·s ⁻¹) | 20 115.85 | 20 115.85 |
| 氧化剂泵的惯性系数/m ⁻¹ | 275.59 | 275.59 |
| 燃料密度/(kg·m ⁻³) | 796 | 796 |
| 燃料输送管的长度/m | 2.461 | 1.289 |
| 燃料输送管的横截面积/m ² | 0.013 48 | 0.013 48 |
| 燃料泵的动态增益 | 2.5 | 2.5 |
| 燃料泵的阻力系数/(m ⁻¹ ·s ⁻¹) | 12 369.62 | 12 369.62 |
| 燃料泵的惯性系数/m ⁻¹ | 588.69 | 588.69 |

表 2 捆绑火箭的纵向模态参数

Tab. 2 Bundled rocket's longitudinal modal parameters

| 时间/ s | 广义 质量/kg | 频率/ Hz | 发动机振型 | | 蓄压器压力/MPa | |
|----------|-------------|-----------|----------|----------|-----------|-------|
| | | | 芯级 | 助推 | 芯级 | 助推 |
| 0 | 170300 | 4.48 | 0.267 85 | 0.455 32 | 0.501 | 0.415 |
| 10 | 148100 | 4.55 | 0.254 57 | 0.445 24 | 0.524 | 0.473 |
| 30 | 126000 | 4.77 | 0.265 84 | 0.435 68 | 0.532 | 0.459 |
| 60 | 118300 | 4.85 | 0.315 61 | 0.453 25 | 0.546 | 0.455 |
| 90 | 117200 | 5.21 | 0.462 89 | 0.595 36 | 0.591 | 0.456 |
| 110 | 116900 | 5.74 | 0.642 35 | 0.745 35 | 0.685 | 0.456 |
| 120 | 114500 | 6.15 | 0.662 59 | 0.790 23 | 0.706 | 0.495 |

图 2 中的模型主要由助推动力学系统、芯级动力学系统和结构系统 3 大部分组成,其中助推动力学系统共有 4 个。助推动力学系统和芯级动力学系统分别由燃料路和氧路构成,由上至下分别为贮箱、波纹管、直管、蓄压器、波纹管、泵和推力室。结构系统与各个部件之间相连的虚线表示箭体结构反馈回来的纵向振动速度和纵向振动加速度信号,各个部件之间的实线表示脉动压力和脉动流量。

为验证模型的正确性,利用建立好的各部件模块,搭建了文献[14]中的单路耦合模型,如图 3 所示。

将文献[14]中的数据代入,比较固有频率 f 和系统阻尼比 ξ ,如图 4,5 所示,Reference-1 和 Reference-2 为文献[14]中的固有频率曲线和系统阻尼比曲线,Establishment-1 和 Establishment-2 为图 3

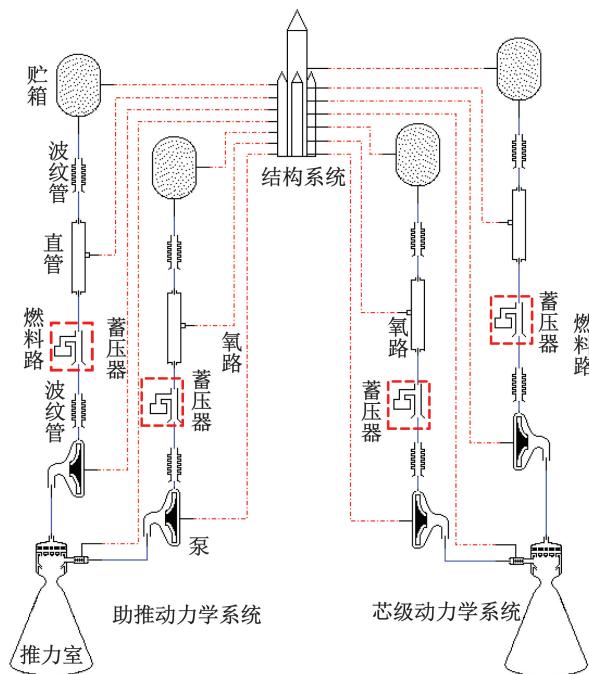


图 2 液体捆绑火箭动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of liquid bundled rocket

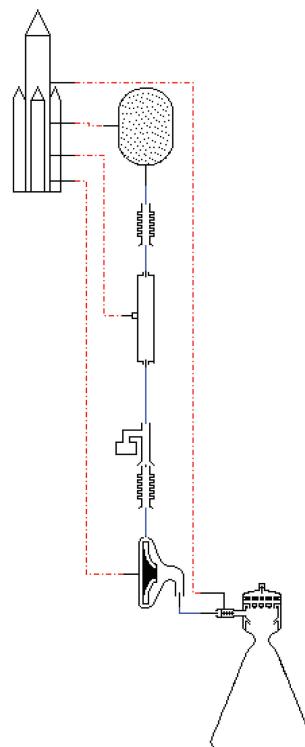


图 3 单组元模型

Fig. 3 Single component model

模型仿真得到的固有频率曲线和系统阻尼比曲线。定量计算结果表明,固有频率与系统阻尼比的偏差在

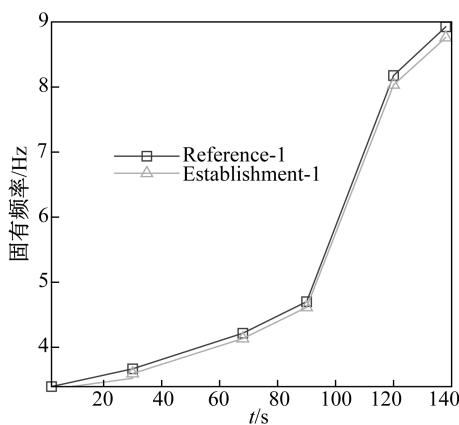


图 4 固有频率
Fig. 4 Natural frequency

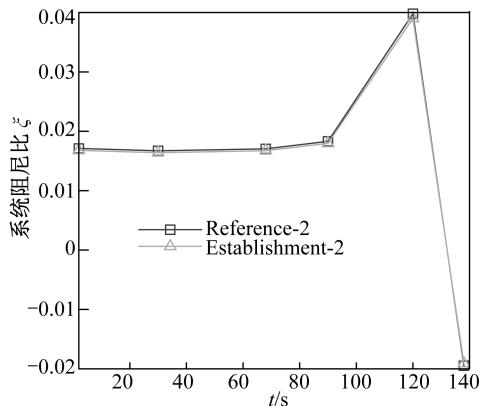


图 5 系统阻尼比
Fig. 5 System damping ratio

2%以内,可见所建立的各部件模块是正确的。这也说明用各部件模块搭建捆绑火箭模型可行。

3 仿真试验及结果分析

3.1 蓄压器的位置对 POGO 振动的影响

液体火箭 POGO 振动系统稳定性条件为:任意时刻,若系统阻尼比为正,则 POGO 振动系统是稳定的;若系统阻尼比为负,则 POGO 振动系统是不稳定的。通过分析系统阻尼比提升量随时间的变化,得到对 POGO 振动抑制效果最好的蓄压器位置。

图 2 中给出可能设置蓄压器的 4 个位置,分别为助推段氧路(zo)、助推段燃料路(zf)、芯级氧路(xo)、芯级燃料路(xf),故蓄压器的设置共有 16 种,如表 3 所示。

表 3 中的“■”表示在该位置上设置蓄压器。为

表 3 蓄压器的安装

Tab. 3 Installation of accumulator

| 设置种类序号 | 助推段燃料路 | 助推段氧路 | 芯级氧路 | 芯级燃料路 |
|--------|--------|-------|------|-------|
| 1 | — | — | — | — |
| 2 | ■ | — | — | — |
| 3 | — | ■ | — | — |
| 4 | — | — | ■ | — |
| 5 | — | — | — | ■ |
| 6 | ■ | — | ■ | — |
| 7 | ■ | ■ | — | — |
| 8 | ■ | — | — | ■ |
| 9 | — | ■ | — | ■ |
| 10 | — | ■ | ■ | — |
| 11 | — | — | ■ | ■ |
| 12 | ■ | ■ | ■ | — |
| 13 | ■ | ■ | — | ■ |
| 14 | ■ | — | ■ | ■ |
| 15 | — | ■ | ■ | ■ |
| 16 | ■ | ■ | ■ | ■ |

确定蓄压器的位置,针对这 16 种设置,在频域进行仿真,以不设置蓄压器的模型(表 3 中的种类 1)得到的系统阻尼比为标准,得到其他设置种类的系统阻尼比提升量($\Delta\xi$)随时间的变化曲线,如图 6 所示。

图 6 中的曲线 2~16 分别表示表 3 中序号为 2~16 的 15 种蓄压器的设置情况。

由图 6(a)可知:曲线 2 和 5 系统阻尼比的变化量几乎为 0,说明蓄压器只设置在助推段燃料路或芯级燃料路,对 POGO 振动的抑制效果很差。在曲线 2 中,虽然在 120 s 时,系统阻尼比降低,但对比曲线 3 和曲线 4 可知:图 6(a)中曲线 2 对系统阻尼比的提升量最高。对比曲线 2 与 3 和曲线 4 与 5 可知:在助推段和芯级中,蓄压器设置在氧路对 POGO 振动抑制效果比设置在燃料路时要好。

由图 6(b)可知:曲线 6,8,9,11 的系统阻尼比提升量很小,说明蓄压器在这几种设置下,对 POGO 振动的抑制效果较差。曲线 7 和 10 的系统阻尼比增加量很明显,曲线 10 的系统阻尼比增加量最大。对比曲线 9 与 10 和曲线 6 与 10 可知:在助推段和芯级中,蓄压器设置在氧路对 POGO 振动抑制效果比设置在燃料路时要好。

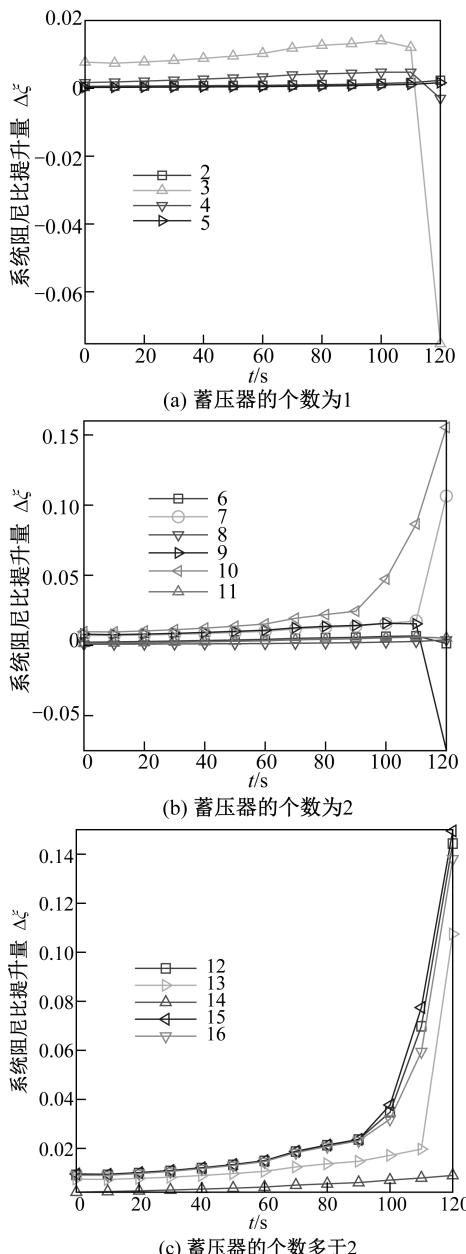


图 6 系统阻尼比变化量

Fig. 6 System damping ratio variation

由曲线 3 和曲线 10 可知: 曲线 10 系统阻尼比提升量更大, 故蓄压器设置在芯级氧路和助推段氧路时对 POGO 振动的抑制效果较好。

对比曲线 3 与 7 和曲线 3 与 10 可知: 增加一个蓄压器, 系统阻尼比的提升量明显增加。继续增加蓄压器的数量, 由图 6(c)可知: 系统阻尼比的提升量很明显。将曲线 16 分别与曲线 12 和 15 作对比, 可发现蓄压器在 4 个位置上都设置时, 系统阻尼比的增加量比在 3 个位置上设置时要小。这是因为在整个系统中, 每增加一个部件, 就会使系统阻尼比变

得更低, 也就会使 POGO 振动更容易发生。虽然蓄压器可抑制 POGO 振动效果, 但蓄压器过多会降低 POGO 振动的抑制效果。图 6(c)中曲线 13 和 14 是因在芯级和助推段的氧路上都没有设置蓄压器, 故系统阻尼比的提升量较小, 这也说明在助推段和芯级中, 蓄压器设置在氧路对 POGO 振动抑制效果比设置在燃料路时要好。

曲线 10 和曲线 15 很相近, 系统阻尼比的提升量都很大, 但曲线 10 只设置了 2 个蓄压器, 系统的可靠性更高且运载火箭的质量更轻。由此可知: 蓄压器设置在芯级氧路和助推段氧路对 POGO 振动的抑制效果最好。

3.2 作用力对 POGO 振动的影响

以蓄压器设置在助推段氧路和芯级氧路作为仿真模型, 分析了贮箱、直管、泵、推力室处产生的作用力对系统阻尼比的影响。以考虑全部作用力得到的系统阻尼比为标准, 分析了不考虑这几个外力时系统阻尼比的相对变化量($d\xi$), 如图 7 所示。

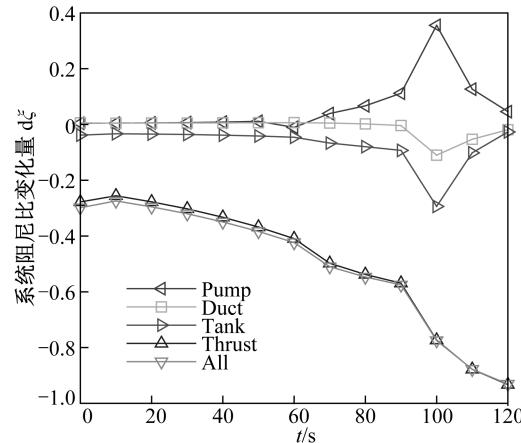


图 7 作用力对系统阻尼比的影响

Fig. 7 Effect of force on system damping ratio

图 7 中的 Pump, Duct, Tank, Thrust, All 分别表示不考虑泵处作用力、直管处作用力、贮箱处作用力、推力室处作用力和所有作用力的系统阻尼比相对变化量曲线。

由图 7 可知: Pump, Duct 和 Tank 这 3 条曲线虽然在 100 s 时, 系统阻尼比产生了相对较大的波动, 但是整体来看系统阻尼比的波动很小。由此可知: 泵、直管和贮箱处的作用力对系统阻尼比的影响很小, 也就是对 POGO 振动的影响很小。

对比分析 Thrust 与 All 这 2 条曲线可知: 这 2

条曲线几乎重叠在一起,说明不考虑推力室处产生的作用力时,其他作用力对系统阻尼比几乎没有影响。推力室处产生的作用力对系统阻尼比的影响与所有的作用力对系统阻尼比的影响几乎相当,即推力室处产生的作用力对系统阻尼比的影响在所有的作用力中占据主导地位,对 POGO 振动的影响很大,贮箱、直管、泵、处产生的作用力对 POGO 振动几乎没有影响。

由此,可通过只考虑推进剂在推力室处产生的作用力,不考虑其他部件处产生的作用力来简化液体捆绑火箭动力学模型。为进一步验证这一结论,在频域仿真中只考虑推力室处作用力的模型,将得到的系统阻尼比与考虑所有作用力得到的系统阻尼比作比较,结果如图 8 所示。

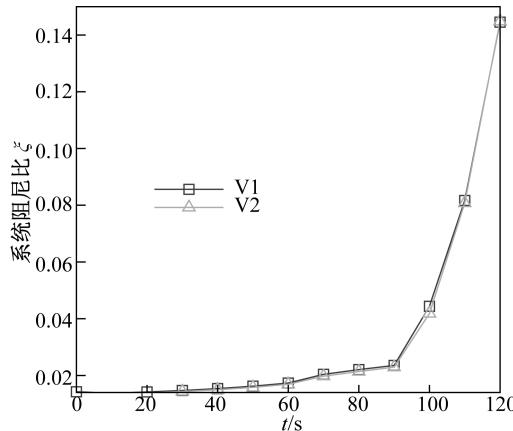


图 8 系统阻尼比对比结果

Fig. 8 Contrast result of system damping ratio

图中:V1 为考虑了所有外力的系统阻尼比随时间的变化曲线;V2 为只考虑推力室处的外力的系统阻尼比随时间的变化曲线。两者之间,系统阻尼比的最大偏差为 5.7%。由图 8 可知:这 2 条曲线几乎重合,故简化模型可较好地模拟推进系统的特性。这也证明了在推力室处产生的作用力对系统阻尼比的影响在所有的作用力中占据主导地位,对 POGO 振动的影响最大,贮箱、直管、泵产生的作用力对 POGO 振动几乎没有影响。

4 结束语

搭建并分析双组元液体捆绑火箭动力学仿真模型,可得以下结论:

- 1) 在助推段和芯级中,蓄压器设置在氧路对 POGO 振动的抑制效果比安装在燃料路时要好;
- 2) 蓄压器设置在芯级氧路和助推段氧路对

POGO 振动的抑制效果最好;

3) 推力室处产生的作用力对 POGO 振动的影响在所有的作用力中占据主导地位;

4) 可通过只考虑在推力室处产生的作用力,不考虑其他部件处产生的作用力,简化液体捆绑火箭动力学模型。

后续研究将集中于 POGO 振动系统的时域仿真,进一步提高 POGO 振动系统的稳定性。

参考文献

- [1] 黄怀德. 液体火箭的 POGO 振动研究[J]. 振动工程学报, 1987, 1(1): 5-13.
- [2] 于建新. 液体运载火箭 POGO 稳定性分析[D]. 北京:北京航空航天大学, 2007.
- [3] 王毅, 朱礼文, 王明宇, 等. 大型运载火箭动力学关键技术及其进展综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2000, 243(1): 29-37.
- [4] TAN S J, WANG Q, WU Z G. Effects of damping ratio and critical coupling strength on pogo instability [J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2016, 53(2): 370-379.
- [5] KERNILIS A, LEMOINE N, BOULET L, et al. Feed system and a method of suppressing the POGO effect: US2017058836[P]. 2017-03-02.
- [6] SIMON A, FORTES-PATELLA R, MOLINA J J M, et al. Acoustic characterization of hydraulic systems: application to POGO Phenomenon [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 49: 052004.
- [7] 陈杰, 方勃, 张亚伟. 基于中心流形理论的液体火箭 POGO 振动系统 Hopf 分岔点特性[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(6): 34-38.
- [8] 谭述君, 王庆伟, 吴志刚. 临界阻尼比法在 POGO 振动稳定性分析中的适用性[J]. 宇航学报, 2015, 36(3): 284-291.
- [9] 唐治. 液体火箭 POGO 振动系统的动力学行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] XU D, HAO Y, TANG G A. New pogo analysis method using rational fitting and three-dimensional tank modeling [J]. AIAA Journal, 2015, 53(2): 405-412.
- [11] 杨明, 杨智春. 液体火箭推进流体系统动特性分析研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(10): 1405-1411.
- [12] 严海, 方勃, 黄文虎. 液体火箭的 POGO 振动研究与参数分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2009, 304(6): 35-40.
- [13] OPPENHEIM B W, RUBIN S. Advanced POGO stability analysis for liquid rockets[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1993, 30(3): 360-373.
- [14] 刘锦帆. 液体运载火箭 POGO 振动时频分析[D]. 北京:北京航空航天大学, 2010.

(本文编辑:姚麒伟)