

液体火箭金属膜盒式蓄压器的动力学模型

张青松¹, 范瑞祥², 刘永婧¹, 罗 盟¹

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘 要:蓄压器是抑制液体火箭 POGO 振动的重要装置,通过推导建立了更具普适性的蓄压器精细化动力学模型,给出了膜盒刚度、动质量以及膜盒组件数量对蓄压实际柔度参数、惯性系数的修正方法,该模型提高了输送系统液路频率的计算精度。针对带有充气管路的蓄压器结构形式,引入了充气管路的分布参数动力学模型。研究发现较长的充气管路不仅会对蓄压器产生一定的附加容积效应,同时会形成新的低频振动,影响蓄压器吸收压力脉动的能力。

关键词:蓄压器;柔度参数;动力学模型;充气管路;阻抗特性

中图分类号:V421.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2021)02-0081-06

Dynamic model study of metal bellows accumulator for liquid launch vehicles

ZHANG Qingsong¹, FAN Ruixiang², GA Yongjing¹, LUO Meng¹

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;
2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Accumulator is an important device used for POGO prevention of liquid rockets. In this paper, a general and accurate dynamic model of bellows accumulator was developed by theoretical derivation. A corrected method of compliance and inertia parameters considering the mechanical stiffness, moving mass and number of bellows subassembly was present. This model improves the precision of the frequency calculation of the fluid feeding system. As to the accumulator with charging duct, a distributed parameter model was introduced to research the influence of a long duct for the accumulator. The research shows that a long charging duct will make additional volume and meantime introduce low frequency vibration, which affects the accumulator performance.

Keywords: accumulator; compliance parameter; dynamic model; charge duct; impedance characteristic

0 引言

液体火箭 POGO 振动是动力系统压力脉动与结构纵向振动相耦合而产生的动力学不稳定问题^[1-2],通常在推进剂输送系统上安装蓄压器是抑

制 POGO 振动的主要措施^[3-8]。根据蓄压器结构形式和工作方式的不同,可以将蓄压器分为贮气式和注气式^[9]两大类。贮气式蓄压器通常用一个弹性结构将工作气体封存起来,工作过程中蓄压器的能量值基本保持不变,目前国内液体运载火箭均采用

金属膜盒作为蓄压器的贮气结构^[10],对于此类蓄压器,影响其工作性能的主要因素是膜盒组件的失稳性能和容积特性^[11-12]。

文献[13]论述了蓄压器对输送系统变频降幅特性的影响,并指出蓄压器的容积和连接管路的液阻是影响蓄压器变频降幅特性的主要因素。文献[14]通过建立集中参数模型分析了蓄压器对试车台供应管路固有频率的影响。文献[15]从蓄压器中工作气体状态方程出发,建立蓄压器的非线性模型,并对管路和箭体结构耦合系统进行了时域仿真,研究结果表明蓄压器的非线性模型不仅可以反映出系统每个时刻的稳定性,还能体现 POGO 振动失稳时发散和收敛的过程,以及蓄压器处压力脉动变化的非对称特点。

目前 POGO 振动分析中蓄压器的柔度是比较重要的一个模型参数^[16-18],与蓄压器内充气量的多少直接相关,通常在计算蓄压器柔度时忽略结构参数的影响,仅考虑了蓄压器内部气体的柔性效应。文献[19]研究了膜盒机械刚度对蓄压器柔度的影响,通过引入膜盒机械对柔度的修正,提高了理论分析的精度,但研究结果仅适用于单膜盒的蓄压器。

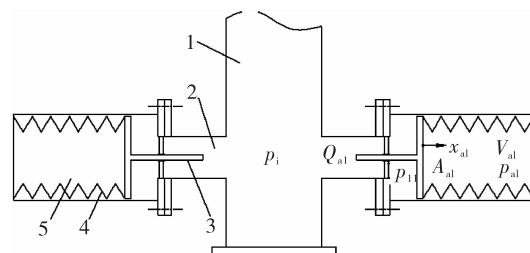
针对目前国内液体运载火箭上广泛应用的多膜盒蓄压器,在以往仅考虑膜盒内气体变化过程的传统模型基础上,本文建立了考虑膜盒机械刚度、动质量、不同膜盒组件数量等影响因素的蓄压器精细化动力学模型,给出了膜盒机械刚度、动质量对多膜盒蓄压器的柔度系数、惯性系数的修正方法,并据此分析获得了不同工作压力下膜盒机械刚度对蓄压器柔度的影响规律。对于带有较长充气管路的膜盒式蓄压器,本文建立了考虑充气管路声学效应的蓄压器动力学模型,研究不同充气管路长度对蓄压器阻抗特性的影响规律。相关理论分析模型已应用于新一代运载火箭的 POGO 抑制设计中,对提高理论分析精度和确定结构设计参数具有重要意义。

1 多膜盒蓄压器的动力学模型及结构参数的影响

1.1 多膜盒蓄压器的动力学模型

金属膜盒式蓄压器是目前国内液体火箭常用的 POGO 抑制装置,安装于输送管与发动机的对接

部位。蓄压器的结构原理及其与输送管的连接关系如图 1 所示,工作气体贮存于蓄压器膜盒中,膜盒由多层金属膜片焊接而成。根据能量值指标的不同,1 台蓄压器通常由单个或多个膜盒组件组成,目前使用较多的是两个膜盒或者 3 个膜盒。



1-输送管;2-蓄压器与输送管之间的连通管;
3-导向组件;4-金属膜盒;5-蓄压器气腔。

图 1 金属膜盒式蓄压器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bellows accumulator

对于每一个独立的膜盒组件,当其受到输送管路中推进剂的压力脉动作用时,对于蓄压器入口流体及膜盒导向组件建立如下形式的运动方程和连续方程。

$$I_{a1} \cdot \frac{dQ_{a1}}{dt} = p_i - p_{i1} - R_{a1} \cdot Q_{a1} \quad (1)$$

$$m_{a1} \cdot \frac{d^2 x_{a1}}{dt^2} = (p_{i1} - p_{a1}) A_{a1} - k_{a1} x_{a1} \quad (2)$$

$$Q_{a1} = \rho_p A_{a1} \frac{dx_{a1}}{dt} \quad (3)$$

式中: p_i 为蓄压器入口脉动压力; Q_{a1} 、 p_{i1} 为膜盒组件 1 液腔脉动流量、脉动压力; I_{a1} 、 R_{a1} 为膜盒组件 1 入口的惯性系数、阻力系数; x_{a1} 、 A_{a1} 、 m_{a1} 、 k_{a1} 为膜盒组件 1 的位移、横截面积、动质量、机械刚度; p_{a1} 为膜盒组件 1 内的气体压力; ρ_p 为推进剂密度。

蓄压器在吸收输送系统中推进剂脉动的过程中,膜盒组件在平衡位置附近作小幅振动,由于时间周期较短工作气体来不及与外界换热,膜盒内气体的变化过程近似按绝热过程考虑,压力变化与体积变化的关系满足绝热方程

$$\frac{1}{p_{a1}} \cdot \frac{dp_{a1}}{dt} + \frac{\gamma}{V_{a1}} \cdot \frac{dV_{a1}}{dt} = 0 \quad (4)$$

式中: \bar{p}_{a1} 、 \bar{V}_{a1} 为膜盒组件 1 稳态的气体压力、气腔容积; γ 为气体的绝热指数。

由式(1)~(4)可以建立描述蓄压器膜盒组件 1 入口脉动压力和脉动流量的动力学方程

$$\frac{dp_i}{dt} = \left(\frac{1}{\rho_p \bar{V}_{al}} + \frac{k_{al}}{\rho_p A_{al}^2} \right) \cdot Q_{al} + R_{al} \cdot \frac{dQ_{al}}{dt} + \left(I_{al} + \frac{m_{al}}{\rho_p A_{al}^2} \right) \cdot \frac{d^2 Q_{al}}{dt^2} \quad (5)$$

目前液体火箭上的金属膜盒式蓄压器通常是由多个相同的膜盒组件构成,所以对于整个蓄压器而言,描述其入口脉动压力与脉动流量之间相互关系的动力学方程为

$$\frac{dp_i}{dt} = \left(\frac{1}{n \cdot \rho_p \bar{V}_{al}} + \frac{k_{al}}{n \rho_p A_{al}^2} \right) \cdot Q_a + \frac{R_{al}}{n} \cdot \frac{dQ_a}{dt} + \left(\frac{I_{al}}{n} + \frac{m_{al}}{n \rho_p A_{al}^2} \right) \cdot \frac{d^2 Q_a}{dt^2} = \frac{1}{C_a} \cdot Q_a + R_a \cdot \frac{dQ_a}{dt} + I_a \cdot \frac{d^2 Q_a}{dt^2} \quad (6)$$

式中: n 为膜盒组件的数量; Q_a 为进入整个蓄压器的脉动流量($Q_a = \sum_{i=1}^n Q_{ai}$); C_a 、 R_a 、 I_a 为整个蓄压器的柔度系数、阻力系数、惯性系数。

经过上述推导,与仅考虑蓄压器内气体的柔度系数(C'_a)、单个膜盒的液体阻力系数(R_{al})和惯性系数(I_{al})的数学模型相比,在考虑蓄压器的实际组成和结构参数之后,蓄压器的动力学模型在形式上具有一致性,但整个蓄压器的柔度系数、阻力系数、惯性系数均需蓄压器的实际结构参数进行修正,修正方法如下。

$$C_a = \frac{1}{\frac{1}{C'_a} + \frac{k_{al}}{n \rho_p A_{al}^2}} \quad (7)$$

表 1 膜盒机械刚度对 1 个三膜盒蓄压器的影响分析

Tab. 1 Influence of bellows stiffness for an accumulator with three bellows

膜盒刚度/ (N · mm ⁻¹)	理论柔度/(m · s ²)	实际柔度/(m · s ²)	膜盒刚度的影响/%	
			对柔度的影响	对输送系统一阶频率的影响
10	5.007 × 10 ⁻⁶	4.868 × 10 ⁻⁶	-2.772	1.416
20		4.737 × 10 ⁻⁶	-5.395	2.812
30		4.612 × 10 ⁻⁶	-7.880	4.189
40		4.494 × 10 ⁻⁶	-10.238	5.549
50		4.382 × 10 ⁻⁶	-12.478	6.891
60		4.275 × 10 ⁻⁶	-14.609	8.217

注:单膜盒的能量值为 0.3 MPa · L,蓄压器液腔压力按 0.35 MPa 进行分析;理论柔度是指蓄压器内气体的柔度,实际柔度是指综合考虑气体的柔度和膜盒结构刚度影响之后的柔度。

$$R_a = \frac{R_{al}}{n} \quad (8)$$

$$I_a = \frac{I_{al}}{n} + \frac{m_{al}}{n \rho_p A_{al}^2} \quad (9)$$

1.2 结构参数对蓄压器模型系数的影响分析

考虑蓄压器膜盒运动部分的质量之后,蓄压器的惯性系数会增加,不利于蓄压器吸收高于其谐振频率的压力脉动。蓄压器膜盒数量增加之后,在增加蓄压器柔度的同时,也降低了膜盒刚度及其动质量部分对蓄压器柔度和惯性系数的不利影响,在此不再展开详细论述。

受蓄压器膜盒刚度的影响,蓄压器的实际柔度会有所降低,刚度越大蓄压器柔度降低的越多,分析结果见表 1;受蓄压器膜盒刚度的影响,蓄压器实际柔度及输送系统一阶频率的计算结果与理论值相比的偏差如图 2 所示。

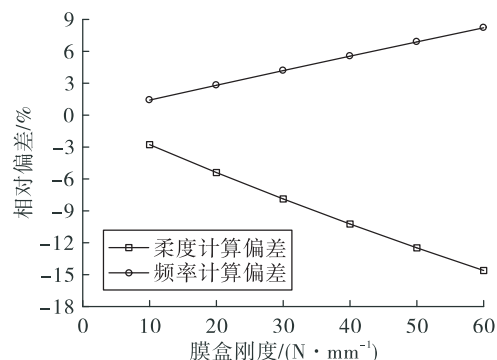


图 2 不同膜盒刚度对蓄压器柔度及系统频率的影响

Fig. 2 Influence of bellows stiffness for accumulator compliance and system frequency

表 2 不同压力下膜盒刚度对 1 个三膜盒蓄压器的影响分析

Tab. 2 Influence of bellows stiffness with different pressure for an accumulator with three bellows

液腔压力/MPa	理论柔度/($\text{m} \cdot \text{s}^2$)	实际柔度/($\text{m} \cdot \text{s}^2$)	膜盒刚度的影响/%	
			对柔度的影响	对输送系统一阶频率的影响
0.25	9.813×10^{-6}	8.208×10^{-6}	-16.361	9.344
0.30	6.815×10^{-6}	6.000×10^{-6}	-11.960	6.576
0.45	3.029×10^{-6}	2.856×10^{-6}	-5.694	2.974
0.75	1.090×10^{-6}	1.067×10^{-6}	-2.127	1.081
1.05	5.563×10^{-7}	5.502×10^{-7}	-1.097	0.553
1.35	3.365×10^{-7}	3.343×10^{-7}	-0.666	0.335
1.65	2.253×10^{-7}	2.243×10^{-7}	-0.447	0.224

注:单膜盒的能量值为 $0.3 \text{ MPa} \cdot \text{L}$;膜盒的机械刚度为 35 N/mm 。

对于一个特定的膜盒式蓄压器而言,不同压力工况下,膜盒机械刚度对蓄压器柔度参数的影响也是不同的。表 2 给出了不同压力工况下蓄压器理论柔度及考虑膜盒机械刚度影响后实际柔度的计算结果,从中可以看出,随着蓄压器入口工作压力的提高,膜盒机械刚度对蓄压器柔度的影响逐渐降低。在低压力工作段,膜盒机械刚度对蓄压器柔度的影响非常显著,此时若不考虑膜盒机械刚度的影响,蓄压器柔度的计算值会出现 15% 以上的偏差,仅受此单一偏差因素的影响,就会给输送系统一阶频率的计算结果带来将近 10% 的偏差,对比分析结果如图 3 所示。在低压力工况下更需要关注膜盒机械刚度对蓄压器性能参数的影响。

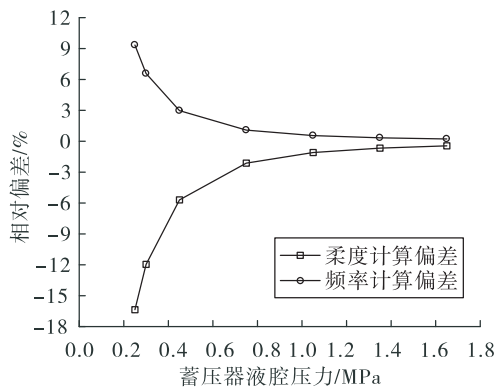


图 3 不同压力下膜盒刚度对蓄压器柔度及系统频率的影响
Fig. 3 Influence of bellows stiffness with different pressure for accumulator compliance and system frequency

2 充气管路对蓄压器动态特性的影响

2.1 考虑充气管路的蓄压器动力学模型

对于在推进剂加注过程中进行充气的蓄压器,为提高充气的便利性,通常需要将蓄压器的充气口引出到箭体外适当的地方。充气管路的引入,会对蓄压器吸收输送系统中压力脉动的能力产生一定影响,体现在对蓄压器阻抗特性的影响上。

蓄压器充气管路通常长细比比较大,将蓄压器充气管路视作集中参数将其影响等效为蓄压器的附加容积,仅适用于管路较短或频率较低的情况。当充气管路较长时,需要考虑充气管路的声学特性对蓄压器工作过程的影响。

在式(4)的基础上,进一步考虑蓄压器上充气口处的脉动流量,则建立蓄压器气腔的方程

$$\frac{dp_a}{dt} = \frac{1}{C_a} \cdot \left(Q_a - \frac{\rho_p}{\rho_g} \cdot Q_d \right) \quad (10)$$

式中: ρ_g 为充气管内气体的密度; Q_d 为蓄压器充气口处的脉动流量。

根据文献[20],对蓄压器充气管路建立频域的一维可压缩模型

$$\begin{bmatrix} p_e \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \theta_d & -\frac{Z_d}{\theta_d} \sinh \theta_d \\ -\frac{\theta_d}{Z_d} \sinh \theta_d & \cosh \theta_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_a \\ Q_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\theta_d = s \frac{L_d}{a_d} \cdot \sqrt{\frac{sI_d + R_d}{sI_d}} \quad (12)$$

式中: p_e 为充气导管末端脉动压力; s 为拉普拉斯算子; L_d 、 R_d 、 I_d 分别为充气导管的长度、阻力系数、惯性系数; a_d 为充气导管内气体声速; $Z_d = R_d + s \cdot I_d$ 为充气导管的阻抗。

蓄压器对输送系统出口压力脉动的吸收作用,主要取决于蓄压器的阻抗特性,在所关注的频率范围内,蓄压器的阻抗越小,则对流量脉动的吸收能力就越强,蓄压器降低输送系统出口压力脉动的效果就越显著。根据式(10)~(12)可以推导出考虑充气管路声学效应的蓄压器阻抗

$$Z_a = \frac{p_i}{Q_a} = \frac{1}{sC_a + \frac{\rho_p}{\rho_g} \cdot \frac{\theta_d \cdot \sinh \theta_d}{(sI_d + R_d) \cdot \cosh \theta_d}} + sI_a + R_a \quad (13)$$

2.2 充气管路长度对蓄压器阻抗特性的影响

蓄压器充气管路长度对蓄压器的阻抗特性有一定影响,特别是当充气管路比较长时,对蓄压器阻抗特性的影响就更加明显。充气管路对蓄压器的影响主要体现在两个方面,一方面相当于增加了蓄压器气腔的工作容积,另一方面由于充气管路的声学效应会在蓄压器上引入新的低频特性。

图4和图5给出了不同充气管路长度对某低温蓄压器的阻抗特性的影响分析结果,该蓄压器采用氦气作为工作介质。从计算结果可以看出,充气管路的附加容积效应对蓄压器的动特性影响较小,但由于长管路的声学效应,会对蓄压器阻抗的特性曲线产生很大影响。在考虑充气导管的声学效应之后,在充气导管的固有声学频率附近会使蓄压器阻抗产生很大的峰值,在这个频段内会显著影响蓄压器吸收压力脉动的效果;而在小于充气管路的一阶固有频率的频段内,受充气管路声学效应的影响,蓄压器的阻抗明显降低,距离一阶频率越近,阻抗值降低程度也越大,有助于增强蓄压器吸收压力脉动的能力。充气管路越长,其固有频率越低,对蓄压器低频段的阻抗特性影响也越大。因此,在运载火箭 POGO 抑制设计中需要结合蓄压器的工作频带范围,控制充气管路的长度,以尽量避免充气管路

过长给蓄压器吸收压力脉动带来不利影响。

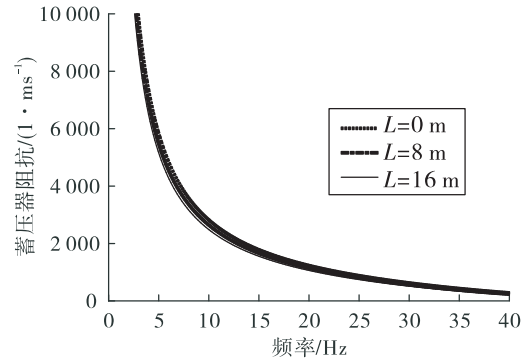


图4 附加容积效应对蓄压器阻抗特性的影响

Fig. 4 Influence of accessional volume for accumulator impedance of charging duct

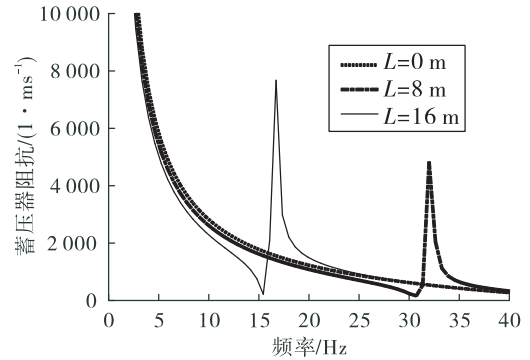


图5 声学效应对蓄压器阻抗特性的影响

Fig. 5 Influence of acoustics for accumulator impedance of charging duct

3 结论

本文建立了金属膜盒式蓄压器的精细化动力学模型,给出了膜盒刚度、动质量以及膜盒数量对蓄压实际柔度参数、惯性系数的修正方法。分析结果表明,膜盒机械刚度对蓄压器柔度的影响随压力工况变化呈非线性特征,在低压力工况下,膜盒机械刚度对蓄压器柔度影响非常显著,可达约 16.4%。

针对带有充气管路的膜盒式蓄压器结构形式,计算结果表明较长的充气管路不仅会对蓄压器产生一定的附加容积效应,同时会形成新的低频振动,影响蓄压器吸收压力脉动的能力。因此,在 POGO 抑制设计中需要结合蓄压器的工作频带范围,

对充气管路的长度进行控制。

参考文献:

- [1] OPPENHEIM B W, RUBIN S. Advanced Pogo stability analysis for liquid rockets [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1993, 30(3): 360-373.
- [2] 张青松, 张兵. 大型液体运载火箭 POGO 动力学模型研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(5): 525-531.
- [3] RANSOM D, DOIRON H. Experimentally validated Pogo accumulator flow resistance model [C]//47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Diego, California: AIAA, 2011.
- [4] LARSEN C E. NASA experience with Pogo in spaceflight vehicles[R]. RTO-MP-AVT-152, 2008.
- [5] 张智. 载人运载火箭技术回顾与展望[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(2): 56-61.
- [6] 汤波, 于子文, 张青松. 利用稳定性相图进行的 POGO 抑制设计[J]. 强度与环境, 2009, 36(1): 32-38.
- [7] 唐冶, 方勃, 张业伟, 等. 推进系统参数变化对液体火箭纵向振动响应的影响分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(12): 189-194.
- [8] 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(6): 35-40.
- [9] 万屹仑, 付欣毓, 张黎辉, 等. 注气式蓄压器系统工作特性仿真分析[J]. 火箭推进, 2018, 44(3): 37-42.
- WAN Y L, FU X Y, ZHANG L H, et al. Simulation analysis on operating characteristics of gas-filled accumulator system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(3): 37-42.
- [10] 司徒斌, 高普云. 低温运载火箭 POGO 抑制系统研究[J]. 低温工程, 2006(2): 58-64.
- [11] 王亚军, 陈牧野, 周浩洋. 采用有限元方法的平板锥形金属膜盒内压柱失稳研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(1): 7-13.
- [12] 张婷, 满满, 张翼, 等. 运载火箭用蓄压器膜盒容积测量方法及影响因素研究[J]. 液压与气动, 2020(4): 87-90.
- ZHANG T, MAN M, ZHANG Y, et al. Measurement method and influencing factors of the volume of the accumulator box[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(4): 87-90.
- [13] 廖少英. POGO 蓄压器变频降幅特性分析[J]. 上海航天, 2002, 19(1): 32-35.
- [14] 靳爱国. 蓄压器对发动机试车液路固有频率影响分析[J]. 火箭推进, 2005, 31(5): 11-14.
- JIN A G. Effect of buffer on frequency of engine flow system in hot tests[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(5): 11-14.
- [15] 任辉, 任革学, 荣克林, 等. 液体火箭 Pogo 振动蓄压器非线性仿真研究[J]. 强度与环境, 2006, 33(3): 1-6.
- [16] 马道远, 王其政, 荣克林. 液体捆绑火箭 POGO 稳定性分析的闭环传递函数法[J]. 强度与环境, 2010, 37(1): 1-7.
- [17] 王庆伟, 王小军, 张青松, 等. 液体火箭 POGO 振动团聚模型研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 8-13.
- [18] 刘涛, 刘锦凡, 唐国安. 液体火箭 POGO 振动分析的矢量拟合法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 26-30.
- [19] 刘锦凡, 孙丹, 陈雪巍, 等. 蓄压器膜盒机械刚度对液体火箭 POGO 振动影响研究[J]. 振动与冲击, 2016(19): 168-171.
- [20] 王其政, 黄怀德, 姚德源. 结构耦合动力学[M]. 北京: 宇航出版社, 1999.