

# 液体火箭发动机泵的 POGO 气蚀 动特性试验研究

王 珺, 胡 鹏, 颜 勇

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 为获取液体火箭发动机泵的 POGO 动特性参数, 围绕泵的气蚀动特性开展了一系列试验研究。首先描述了试验系统, 阐述了试验原理; 其次, 以泵入口 0.5 MPa 工况为例, 介绍了试验数据的分析过程; 最后, 结合试验数据给出了气蚀柔度、动态增益等动特性参数的试验结果。结果表明, 在泵入口压力 0.25~0.86 MPa 范围内, 无量纲气蚀柔度约为 0.6~2, 动态增益主要集中在 2~5, 最高达到 13。

**关键词:** 泵气蚀动特性参数; POGO; 试验系统; 气蚀柔度; 动态增益

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 04-0026-06

## Experimental investigation of POGO cavitation dynamic characteristic for liquid rocket engine pump

WANG Jun, HU Peng, YAN Yong

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract:** A series of experimental investigations were performed in order to obtain the POGO dynamic parameters of liquid rocket engine pump. The experimental system is described and the main test principle is expounded. The analysis progress of test data at pump inlet pressure of 0.5 MPa is introduced. Based on test results, the POGO dynamic characteristic parameters, such as cavitation compliance and pump dynamic gain, are given. The investigation shows that, under the condition of pump inlet pressure of 0.25~0.86 MPa, the non-dimensional cavitation compliance is 0.6~2, the pump dynamic gain is 2~5 and the maximum observation value is up to 13.

**Keywords:** pump cavitation dynamic parameter; POGO; experimental system; cavitation compliance; dynamic gain

收稿日期: 2012-01-15; 修回日期: 2012-03-06

基金项目: 国家“863”项目(2007AA705302)

作者简介: 王珺 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机系统设计

## 0 引言

POGO 是一种由火箭结构和推进系统耦合所产生的纵向自激振动现象, 常常发生在大型液体火箭上。液体火箭发动机泵的气蚀动特性参数是计算运载火箭 POGO 稳定性的重要参数, 直接影响到分析结果的准确性。泵的气蚀动特性主要由气蚀柔度  $C_b$ 、泵动态增益  $m+1$ 、质量流量增益因子  $M$ 、线性化流阻  $R_p$  和惯性  $L_p$  等参数来描述, 但通过理论计算求得这些参数非常困难, 若想准确获取必须通过试验<sup>[1-3]</sup>。

在泵的气蚀动特性参数中, 对运载火箭 POGO 稳定性影响最大的是气蚀柔度和动态增益。其中气蚀柔度对 POGO 现象是否发生、何时以何种频率发生等问题都有直接影响, 而动态增益则与箭体耦合系统 POGO 稳定裕度有关<sup>[4]</sup>。所以, 获取真实、准确的泵气蚀动特性参数对运载火箭 POGO 稳定性分析至关重要。

某发动机是我国新一代运载火箭芯一级发动机, 推进剂为液氢/液氧, 采用燃气发生器循环。为准确获取发动机氧泵气蚀动特性参数, 本文进行了某氧泵气蚀动特性试验研究, 具体包括气蚀柔度试验和动态增益试验两部分, 试验覆盖管路扫频激振、管泵扫频激振以及管泵定频激振等三种试验状态。通过对试验数据进行时域、频域下的分析, 最终得到了某氧泵在不同入口压力下的气蚀柔度和动态增益。为降低成本, 本轮试验介质采用常温水。泵的动特性水试相对于采用真实介质进行泵或整机动特性试验来说较为简单。国外学者在研究泵的 POGO 动态特性时, 都会开展相关的水试试验研究<sup>[2,5-6]</sup>。

## 1 试验系统描述

氧泵 POGO 气蚀动特性试验系统包括两个部分: 水力系统 (图 1) 和激振系统 (图 2)。

水力系统是一个带有激振功能的闭式水力循环。泵前管路安装隔离贮箱的目的是衰减上游来流压力脉动, 实现管路入口“开”边界, 系统额

定流量由泵后管路文氏管控制, 试验系统配置与国外同类试验研究系统类似<sup>[2,7-8]</sup>。试验系统出口边界后设置调节阀, 通过调节阀门开度以控制文氏管气蚀程度, 尽量减小气蚀噪声对试验的干扰。同时为避免试验台结构固有频率干扰目标参数的获取, 试验中布置了多处结构振动测点。

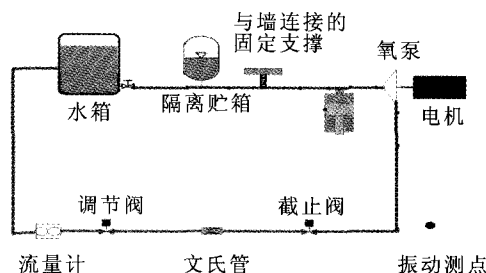
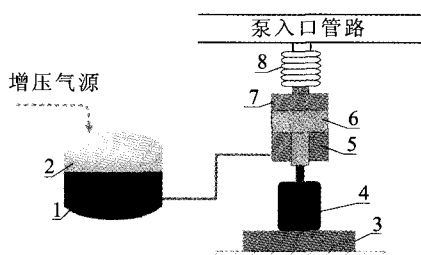


图 1 水力试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water power experimental system

激振系统由激振器和平衡活塞作动装置组成, 动力油站控制激振器作动。为适应系统压力变化范围 (0.25~0.86 MPa), 增加激振活塞压力平衡系统, 给下活塞腔提供压力以平衡激振活塞静量力。



1-增压用常温水; 2-增压气源 (压缩空气);  
3-振动台; 4-激振器; 5-下活塞缸; 6-激振活塞;  
7-上活塞缸; 8-连接软管

图 2 激振系统原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration exciting system

泵的气蚀柔度  $C_b$  采用“共振法”进行测量, 具体内容为三个步骤: 首先, 在泵不工作、泵后截止阀关闭状态下进行管路扫频激振, 得到不同泵入口压力工况下隔离贮箱到截止阀一段管路 (开-闭边界) 一阶纵向谐振频率; 其次, 泵运转至额定工况后, 对试验系统进行管泵扫频激振, 得到不同泵入口压力下隔离贮箱到泵出口位置段

管路（开-闭边界）一阶纵向谐振频率；最后，通过公式换算得到氧泵气蚀柔度。

根据管路、管泵的试验结果，可分别得到泵不运转时泵前管路的一阶特征频率  $\omega_{ld}^2 = \frac{1}{C_d \cdot L_d}$  和泵运转时泵前管路的一阶特征频率  $\omega_1^2 = \frac{1}{(C_d + C_b) \cdot L_d}$ ，两次试验获取的柔度之差就是泵的气蚀柔度，即  $C_b = \frac{1}{\omega_1^2 \cdot L_d} - \frac{1}{\omega_{ld}^2 \cdot L_d}$ 。其中  $C_d$  为管路试验泵前管路柔度； $L_d$  为管路试验中从开边界到截止阀惯性。

需要特别指出的是，由于管路试验中管路出口通过截止阀保证出口闭边界，当试验系统运转起来时，泵出口位置为闭边界（泵后压力较高，认为是不可压流）。考虑试验系统的实际情况，应对气蚀柔度换算公式作如下修正：

$$C_b = \frac{1}{\omega_1^2 \cdot L_p} - \frac{1}{\omega_{ld}^2 \cdot L_d} \cdot \frac{V_p}{V_d}$$

式中： $L_p$  为管泵试验中从开边界到泵入口的管路惯性； $V_p$  为泵前管路容积； $V_d$  为开边界到截止阀段管路的容积。

除气蚀柔度外，泵的动态增益是另一个需要试验获取的重要参数。结合泵的 POGO 动特性方程<sup>[9]</sup>，泵的动态增益值表达式为：

$$m+1 = (\delta P_2 / \delta P_1) (1 + Z_p / Z_e)$$

式中： $\delta P_1$  为泵入口压力脉动幅值； $\delta P_2$  为泵出口压力脉动幅值； $Z_p$  为泵阻抗； $Z_e$  为泵后管路阻抗。

泵的线性化流阻  $R_p$ 、惯性  $L_p$  均为泵自身固有属性。 $R_p$  可通过水力试验额定点附近扬程曲线得到， $L_p$  可根据泵自身流道结构尺寸统计得到。由于泵叶轮流道复杂且不规则，故泵的惯性采用近似公式  $L_p \approx 1.25 \frac{l_{sp}}{A_{sp}}$  来估算<sup>[10]</sup>。其中， $l_{sp}$  为泵蜗室中线长度； $A_{sp}$  为蜗室通道面积平均值，估算过程中忽略转速对泵惯性的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 气蚀柔度

为获取泵气蚀柔度，分别进行多个入口压力条件下管路扫频激振试验和管泵扫频激振试验。

图 3 所示为泵入口压力 0.5 MPa 下的管路激振试验中泵入口压力时-频图、泵前管路一阶振型试验结果。振型图中横坐标原点为隔离贮箱安装位置，横坐标表示不同测量位置与隔离贮箱的轴向距离。

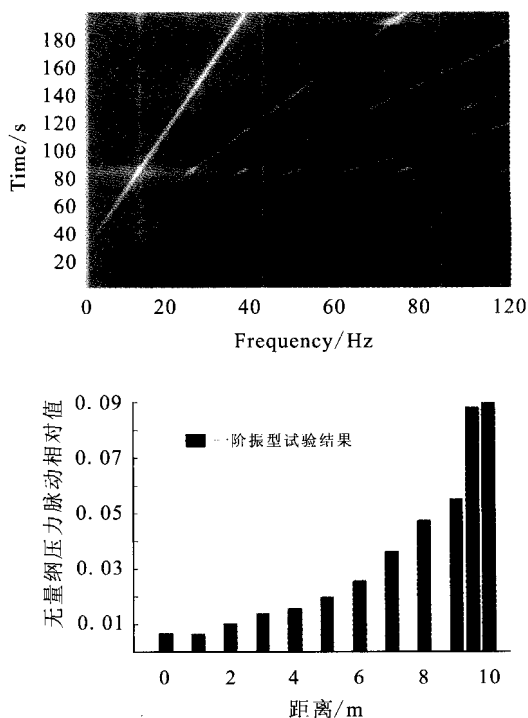


图 3 泵入口压力脉动时-频图与泵前管路一阶轴向压力振型 ( $p_1=0.5$  MPa)

Fig. 3 Diagram of pressure pulsation time-frequency at pump inlet and first-order axial pressure mode of pipe in front of pump ( $p_1=0.5$  MPa)

观察管路扫频激振试验数据可以看出，当激振系统线形扫频至 32 Hz 附近时，试验系统压力脉动响应幅值增大，同时此处并没有与任何固有频率发生谐振，并且管路振型也符合“开-闭”边界下的一阶纵向模态，所以认为 32 Hz 为流体介质自身固有频率。此外，可以看出试验系统结



图5给出的是在泵入口压力0.5 MPa管泵试验中泵入口位置结构振动在轴、径、切三个方向加速度的时-频图。可以看出泵入口处在低频范围内结构噪声较大但并没有明显的固有频率,而在同样位置处的流体压力信号却存在着两阶非常明显的谐振频率。由此可以判断,泵入口位置处谐振频率的振源是流体,低频段内观察到的两阶主频均是流体自身的固有频率,而 $f_1$ 就是管泵激振试验所要测量的目标频率。

综上所述,泵入口0.5 MPa条件下管泵试验一阶轴向谐振频率约13 Hz,泵前管路压力振型分布与国外学者研究结果一致,而从振动测量上能够确认其并非结构模态。据上述判断可认为, $f_1$ 为泵前管路流体纵向一阶谐振频率,即管泵试验中所要得到的目标频率。按照上述试验研究思路,通过开展不同入口压力下的管路、管泵扫频激振试验,分别得到各工况下介质一阶轴向谐振频率,进一步得到不同入口压力的气蚀柔度。

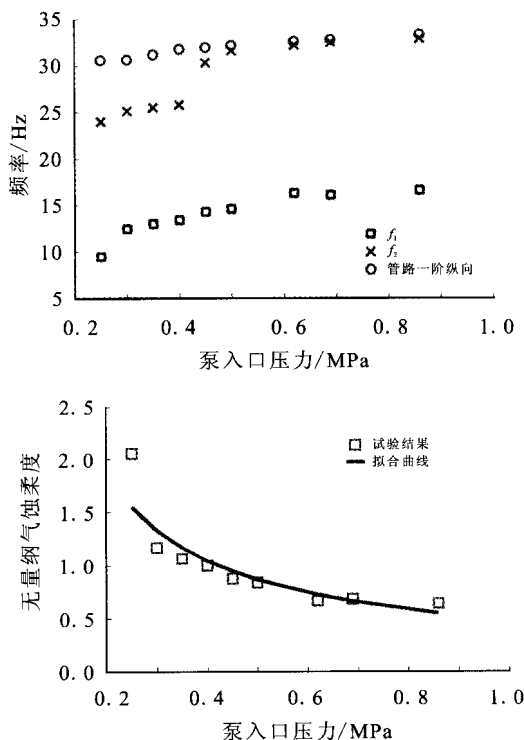


图6 不同工况下泵前管路谐振频率及无量纲气蚀柔度变化规律

Fig. 6 Rule of pump inlet pipe resonant frequency and non-dimensional cavitation compliance under different conditions

图6为管路一阶、管泵一阶、二阶固有频率随入口压力的变化趋势以及无量纲气蚀柔度(实际工况与设计工况下气蚀柔度之比)在不同入口压力下的变化规律。

根据图6给出的气蚀柔度试验结果可以看出,在入口压力0.25~0.86 MPa时,气蚀柔度随入口压力的升高逐渐降低,有较好的规律性;泵入口压力越高,气蚀柔度变化越小;而泵入口压力越低,气蚀柔度变化幅度越大。

## 2.2 动态增益

泵在不同入口压力及不同激振频率下的动态增益是通过定频激振试验获取的。图7所示为在泵入口压力0.5 MPa条件下,对试验系统施加2~45 Hz定频激振所得到的泵入口、出口位置压力脉动信号时-频图。

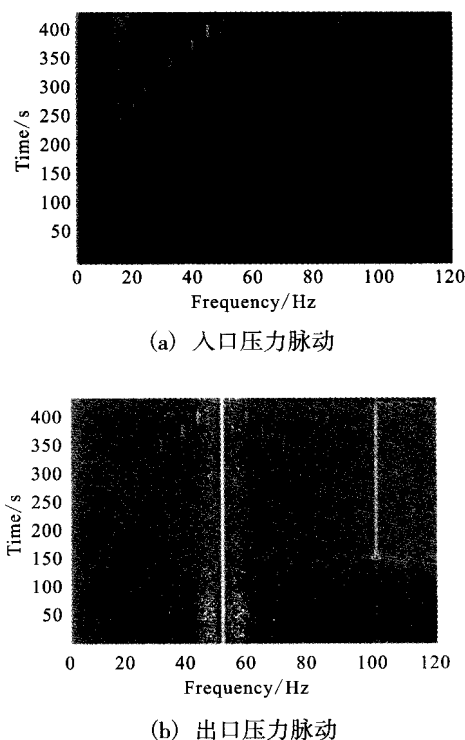


图7 定频激振条件下泵入口、出口压力脉动时-频图 ( $p_1=0.5$  MPa,  $n=18\ 000$  rpm)

Fig. 7 Time-frequency diagram of pump inlet and outlet pressure pulsation at quota vibration exciting frequency ( $p_1=0.5$  MPa,  $n=18\ 000$  rpm)

统计不同试验条件下的泵入口、出口压力脉动幅值,可以得到泵的动态增益随入口压力以及

激振频率的变化。图 8 给出的是本轮试验获取的某发动机氧泵动态增益在不同入口压力、激振频率下的分布。

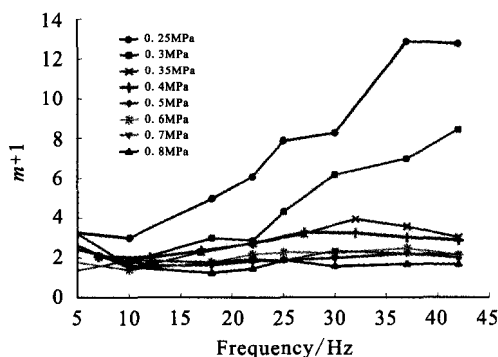


图 8 不同入口压力及激振频率下泵的动态增益分布

Fig. 8 Distributions of pump dynamic gains at different inlet pressure and vibration exciting frequency

由试验结果可知, 动特性增益随着流体振荡频率升高而增大, 随着泵入口压力升高而减小; 当泵入口压力较高时, 动特性增益主要集中在 2~5 之间, 而当泵入口压力降低到 0.35 MPa 以下时, 泵的动态增益会显著增加。泵的动态增益试验结果与分布规律与国外相关研究结果一致<sup>[5]</sup>。

### 3 结束语

通过某发动机氧泵气蚀动特性试验研究, 成功获取了以常温水为介质条件下泵入口压力 0.25~0.86 MPa 范围内气蚀柔度及在此压力范围内 5~42 Hz 泵的动特性增益的真实分布规律和变化趋势。

#### 参考文献:

- [1] COPPOLINO R F, LOCK M H, RUBIN S. Space shuttle POGO studies, ATR-78(7474)-1[R]. USA: The Aerospace Corporation, 1977.
- [2] SHIMURA Takashi. The effects of geometry in the dynamic response of the cavitating LE-7 OX pump[C]//29th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Monterey, CA: AIAA, 1993: 121-131.
- [3] PILIPENKO V V. Providing the LPRE-rocket structure dynamic compatibility[C]//29th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Monterey, CA: AIAA, 1993: 202-212.
- [4] DOTSON K W, RUBIN S, SAKA B H. Effects of unsteady pump cavitation on propulsion-structure interaction in liquid rockets[C]//45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Palm Springs, California: AIAA, 2004: 10-20.
- [5] IACOPOZZI M, LIGNAROLO V, PREVEL D. POGO characterization of Ariane V turbopump LOX pump with hot water[C]//29th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Monterey, CA: AIAA, 1993: 1-9.
- [6] RUBIN Sheldon. An interpretation of transfer function data for a cavitating pump[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida: AIAA, 2004: 111-121.
- [7] RAPPOSELLI Emilio, CERVONE Angelo, TESTA Renzo, et al. Thermal effects on cavitation instabilities in helical inducers [C] //40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida: AIAA, 2004: 151-158.
- [8] SHIMAGAKI Mitsuru, WATANABE Mitsuo, HASHIMOTO Tomoyuki, et al. Effect of the casing configurations on the internal flow in rocket pump inducer[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento, California: AIAA, 2006: 51-58.
- [9] OPPENHEIM B W, RUBIN Sheldon. Advanced POGO stability analysis for liquid rockets, AIAA-92-2454-CP [R]. USA: AIAA, 1992.
- [10] 张涛, 唐虎, 周江平. 可贮存推进剂泵压式液体火箭发动机多次起动系统研究[J]. 火箭推进, 2010 (3): 19-22.
- [11] 曹泰岳. 火箭发动机动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.

(编辑: 王建喜)