

# 燃烧室压力振荡对喷嘴出口 流量振荡影响分析

杨立军, 富庆飞

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

**摘 要:** 从理论上分析了燃烧室压力振荡引起喷嘴出口流量振荡的振荡传递, 推导了振荡传递过程的传递函数。讨论带有各种喷嘴的燃烧室的动态特性, 计算了燃烧室压强、喷嘴压降、喷嘴类型及结构尺寸对燃烧室压力振荡引起喷嘴出口流量振荡的影响, 得到了喷嘴在此传递过程中的影响规律。

**关键词:** 液体火箭发动机; 喷嘴; 供应系统; 燃烧室

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2008) 04-0006-06

## Investigation on the dynamic interaction between injector flow oscillation and combustion chamber pressure oscillation

Yang Lijun, Fu Qingfei

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The propagation process of injector exit flow oscillation induced by combustion chamber pressure oscillation was theoretically researched, and the transfer function of the oscillation was also deduced. The dynamic characteristic of combustion chamber linked with various injectors was discussed. The influence of combustion chamber pressure, injector pressure drop, injector type and configuration on pressure oscillation propagation process was calculated, the influence rule of injector on propagation process was gained.

**Key words:** liquid rocket engine; injector; supply pipe-line; combustion chamber

收稿日期: 2008-05-23; 修回日期: 2008-07-14。基金项目: 国家自然科学基金(50406007)。

作者简介: 杨立军 (1975—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为液体火箭发动机喷雾与燃烧、喷嘴动力学。

符号说明:

$p$  —— 压强  
 $m$  —— 流量  
 $\alpha$  —— 声速  
 $\omega$  —— 振荡频率

$L$  —— 长度  
 $\Delta p$  —— 压降  
 $\Pi$  —— 传递函数

下标:

$g$  —— 供应系统  
 $z$  —— 喷嘴  
 $c$  —— 燃烧室

$in$  —— 喷嘴进口  
 $T$  —— 离心喷嘴切向通道

上标:

$'$  —— 振荡量  
 $-$  —— 无量纲量

1 引言

液体火箭发动机是一个复杂的动态工作系统, 喷嘴在发动机中控制着推进剂的喷注流量, 发动机整个系统中的任何微小振荡或扰动, 都会直接或间接影响喷嘴流量的变化, 进而影响整个发动机动态系统, 因此喷嘴在发动机动态系统中起着非常重要的作用。在发动机系统动态特性分析中, 一般对喷嘴的动态特性进行简化处理, 如将喷注器等效成一个容腔和一个喷孔流出端口组成的组合件。尽管认为喷嘴动态特性对液体火箭发动机燃烧稳定性具有很大影响, 但是不同动态特性的喷嘴在燃烧不稳定性的作用还没有定量的评价。本文在喷嘴动态特性研究的基础上, 通过理论分析, 得到在燃烧室内压力扰动作用下喷嘴出口流量振荡的规律, 为液体火箭发动机喷嘴设计提供指导。

2 喷嘴、供应系统及燃烧室间相互作用

喷嘴通过集液腔与供应系统相连, 供应系统和燃烧室中的扰动传递都是通过喷嘴来实现的, 以离心喷嘴为例, 传递环节如图 1 所示。

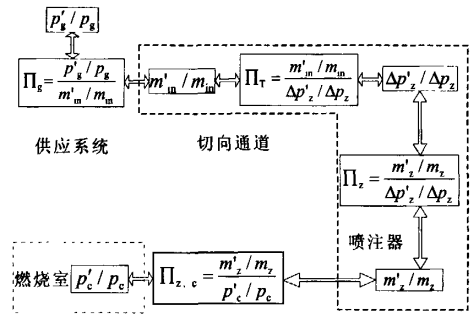


图 1 喷嘴与供应系统以及燃烧室相互关系

Fig.1 Interaction between injector, combustion chamber and supply system

$\Pi_g = (p'_g/p_g)/(m'_m/m_m)$ ——供应系统无量纲压力振荡与喷嘴进口无量纲流量振荡之比;

$\Pi_T = (m'_in/m_in)/(\Delta p'_z/\Delta p_z)$ ——喷嘴进口无量纲流量振荡与喷嘴无量纲压降之比;

$\Pi_z = (m'_z/m_z)/(\Delta p'_z/\Delta p_z)$ ——喷嘴无量纲流量振荡与喷嘴无量纲压降之比;

$\Pi_{z,c} = (m'_z/m_z)/(p'_c/p_c)$ ——喷嘴无量纲流量振荡与燃烧室无量纲压力振荡之比。

3 燃烧室压力振荡对喷嘴出口流量振荡的影响分析

由喷嘴动力学可知, 喷嘴出口流量振荡由整

个喷嘴的压降振荡引起:

$$\frac{m'_z}{m_z} = \Pi_z \frac{\Delta p'_z}{\Delta p_z} \quad (1)$$

喷嘴压降振荡是供应系统压力振荡和燃烧室压力振荡的矢量差。

$$\Delta p'_z = \vec{p}'_g - \vec{p}'_c \quad (2)$$

无量纲形式:

$$\frac{\Delta p'_z}{\Delta p_z} = \frac{p'_g}{p_g} \frac{p_g}{\Delta p_z} - \frac{p'_c}{p_c} \frac{p_c}{\Delta p_z} \quad (3)$$

联立公式 (1)、(3), 得:

$$\frac{m'_z}{m_z} = \Pi_z \left[ \frac{p'_g}{p_g} \frac{p_g}{\Delta p_z} - \frac{p'_c}{p_c} \frac{p_c}{\Delta p_z} \right] \quad (4)$$

由文献 [6] 可知,

$$\frac{p_g}{p'_g} = \frac{p_c}{\Delta p_z} \frac{p'_c}{p_c} \frac{\Pi_g \Pi_T}{\Pi_g \Pi_T \left( \frac{p_g}{\Delta p_z} \right) - 1} \quad (5)$$

由公式 (4)、(5) 可得:

$$\frac{m'_z}{m_z} = \Pi_z \frac{p_c}{\Delta p_z} \frac{p'_c}{p_c} \left[ \frac{p_g}{\Delta p_z} \frac{\Pi_g \Pi_T}{\Pi_g \Pi_T \left( \frac{p_g}{\Delta p_z} \right) - 1} - 1 \right]$$

由此最终可以得到:

$$\Pi_{z,c} = \frac{m'_z/m_z}{p'_c/p_c} = \frac{p_c}{\Delta p_z} \frac{\Pi_z}{\Pi_g \Pi_T \left( \frac{p_g}{\Delta p_z} \right) - 1} \quad (6)$$

由公式 (6) 可以看出, 燃烧室压力振荡引起喷嘴出口流量振荡的传递函数  $\Pi_{z,c}$  取决于喷嘴的传递函数  $\Pi_z$ 、离心喷嘴切向通道的传递函数  $\Pi_T$ 、供应系统的传递函数  $\Pi_g$ 、喷嘴压降  $\Delta p_z$  和燃烧室压力  $p_c$ 。切向通道的传递函数  $\Pi_T$ 、喷嘴的动态传递函数  $\Pi_z$  在相关文献中已经开展了研究。

对于直流喷嘴  $\Pi_z = \Pi_T$ , 因此燃烧室压力振荡引起直流喷嘴出口流量振荡的传递函数为:

$$\Pi_{z,c} = \frac{p_c}{\Delta p_z} \frac{\Pi_T}{\Pi_g \Pi_T \left( \frac{p_g}{\Delta p_z} \right) - 1}$$

## 4 算例及结果分析

根据前面得到的燃烧室压力振荡引起喷嘴出口流量振荡的传递函数, 结合算例进行编程计算分析不同参数对传递函数的影响规律。

选择一简化的双组元挤压式液体火箭发动机, 以其中一路为研究对象。假设发动机燃烧室内有压力振荡, 将引起喷嘴出口处的流量振荡。与喷嘴连接的供应管路长度为 2m, 工质为煤油。将集液腔看成是供应系统的一部分。下面分别研究喷注器型式和结构参数以及燃烧室稳态压力、喷注器压降对压力扰动传递过程的影响规律。

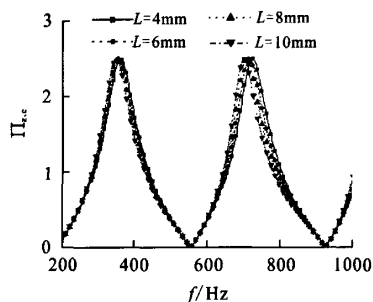
### (1) 直流喷嘴的影响

不同结构形式的喷注器具有不同的动力学特性, 因此不同喷注器结构对振荡从燃烧室传递到喷注器出口过程的影响规律是不同的。直流喷注单元多采用撞击式, 由氧化剂喷孔和燃料喷孔组成, 选择燃料喷孔作为算例模型喷嘴, 喷口直径为 1mm, 喷嘴结构参数见表 1。

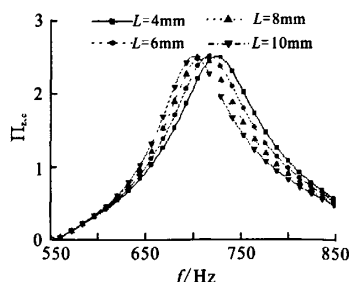
表 1 直流喷嘴结构参数

Tab.1 Configuration parameter of jet injector

喷嘴长度/mm	喷嘴半径/mm
4	1
6	1
8	1
10	1



(a) 直流喷嘴出口流量相对振荡幅频特性



(b) 直流喷嘴出口流量相对振荡幅频特性 (局部放大)

图 2 不同长径比的直流喷嘴出口流量振荡的幅频特性曲线

Fig.2 Spout flow oscillation dynamic characteristics of jet injector with different configuration

燃烧室压强为 4MPa, 重点研究喷孔长度与直径的比值变化的影响。图 2 为由燃烧室压力振荡引起不同长径比直流喷嘴出口处流量振荡的幅频特性曲线。从计算结果可看出, 对于所计算的模型直流喷嘴而言, 在整个频率区间上存在一些振幅极小的频率点, 每两个振荡抑制的频率点之间存在一个频率, 在小于此频率时, 长径比越大, 喷嘴出口流量振荡振幅越大; 在大于此频率时, 长径比越大, 喷嘴出口流量振荡振幅越小。但从图 2 (a) 看出, 总体差别并不大。

(2) 收口型离心喷嘴的影响

图 3 为燃烧室内压力有振荡时, 不同几何特性参数  $A$  的收口型离心喷嘴出口处的流量振荡幅频特性曲线, 收口型离心喷嘴的结构参数见表 2。从计算结果看出, 当燃烧室存在压力振荡时, 喷嘴出口的流量会产生振荡。对于所计算的模型喷嘴, 在振荡频率为 20Hz、370Hz 左右都会产生较强的谐振。所连接的收口型离心喷嘴的几何特性参数  $A$  值越大, 喷嘴出口流量的相对振幅越小。

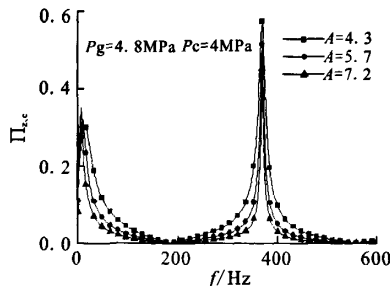


图 3 不同  $A$  值收口型喷嘴出口流量振荡幅频特性曲线  
Fig.3 Spout folw oscillation dynamic characteristics of closed swirl injector with different configuration

表 2 收口型离心喷嘴结构参数  
Tab.2 Configuration of closed swirl injector

几何特性参数 $A$	4.3	5.7	7.2
切向通道半径/mm	0.7	0.7	0.7
切向通道长度/mm	5	5	5
旋流腔半径/mm	2.8	3.5	4.2
旋流腔长度/mm	20	20	20
喷口半径/mm	1	1	1
喷口长度/mm	10	10	10

(3) 敞口型离心喷嘴的影响

图 4 为连接不同几何特性参数  $A$  的敞口型离心喷嘴出口流量振荡的幅频特性曲线。喷嘴的结构参数见表 3。

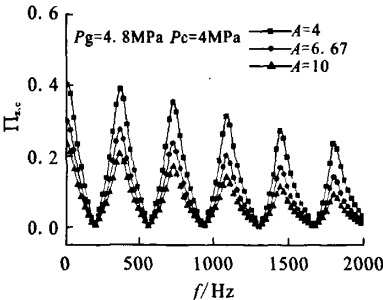


图 4 不同  $A$  值敞口型喷嘴出口流量振荡幅频特性曲线  
Fig.4 Spout flow oscillation dynamic characteristics of open-end swirl injector with different configuration

表 3 敞口型离心喷嘴结构参数  
Tab.3 Configuration of open-end swirl injector

几何特性参数 $A$	4	6.67	10
切向通道半径/mm	0.7	0.7	0.7
切向通道长度/mm	5	5	5
旋流腔半径/mm	2.8	3.5	4.2
旋流腔长度/mm	20	20	20
喷口半径/mm	2.8	3.5	4.2
喷口长度/mm	10	10	10

从计算结果看出, 在发生谐振时, 离心喷嘴的几何特性参数  $A$  值越大, 喷嘴出口流量振荡的相对振幅越小。因为  $A$  值表征了离心喷嘴液体旋涡旋转剧烈程度。 $A$  越大, 离心喷嘴内液体旋涡表面振幅会降低, 导致喷嘴出口流量振幅越小。

(4) 收口型和敞口型离心喷嘴的影响对比

为了在同等条件下进行对比, 使收口型与敞口型离心喷嘴的几何特性参数相同。图 5 所示为收口型和敞口型离心喷嘴发动机系统中, 喷嘴出口流量振荡对燃烧室压力振荡的动态响应。从图 5 可以看出, 当燃烧室内压力发生振荡时, 敞口和收口型离心喷嘴出口流量振荡变化趋势基本相同, 二者都会发生谐振, 而且发生谐振的频率基本相同。收口型离心喷嘴在频率区间上振幅相对较小。这可能是收口型离心喷嘴具有收口段, 对从燃烧室传递来的振荡有一定的阻尼作用。

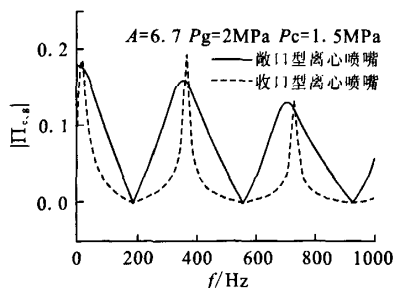


图5 不同结构喷注器出口流量振荡幅频特性

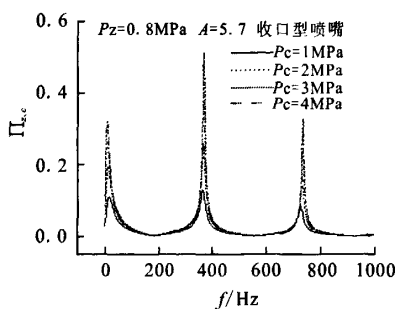
Fig.5 Flow oscillation dynamic characteristics of different injector types

以上所研究的是喷嘴结构及参数对由燃烧室压力振荡引起喷嘴出口流量振荡过程的影响, 下面在确定收口型和敞口型等喷嘴型式的基础上, 计算喷注器压降、燃烧室稳态压强对由燃烧室压力振荡引起的喷嘴出口流量振荡传递过程的影

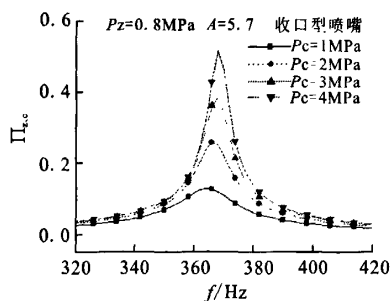
响。

### (5) 燃烧室稳态压强的影响

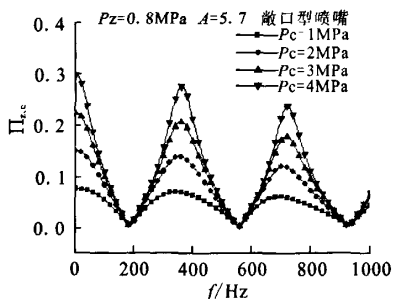
以  $A=5.7$  收口型离心喷嘴、 $A=6.67$  敞口型离心喷嘴和长径比为 10 的直流喷嘴为例, 改变燃烧室压强, 计算燃烧室压强振荡引起喷嘴出口截面流量振荡的传递函数, 图 6 为计算的传递函数幅频特性曲线。a、b 为收口型离心喷嘴, c 图为敞口型离心喷嘴, d 图为直流喷嘴。从图 6 可以看出, 当燃烧室存在压力振荡时, 喷嘴出口截面流量在部分频率点上会对振荡产生极大的响应。不论是收口型离心喷嘴、敞口型离心喷嘴还是直流喷嘴, 影响规律是相同的: 燃烧室稳态压力越大, 由燃烧室压力振荡引起的喷嘴出口流量振荡相对振幅也越大。



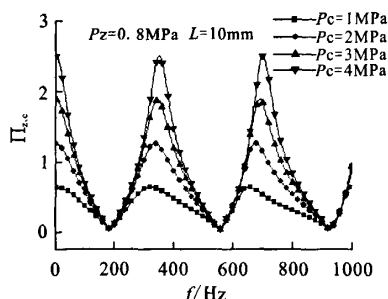
(a) 收口型离心喷嘴



(b) 收口型离心喷嘴幅频特性 (局部放大)



(c) 敞口型离心喷嘴



(d) 直流喷嘴

图6 不同燃烧室压力下喷嘴出口流量振荡的幅频特性曲线

Fig.6 Effect of combustion chamber steady pressure on injector spout flow oscillation dynamic characteristics

### (6) 喷注器压降的影响

以几何特性参数  $A=6.7$  的收口型离心喷嘴、 $A=6.67$  的敞口型离心喷嘴和长径比为 10 的直流喷嘴为例, 改变喷注器压降, 计算燃烧室压强振

荡引起喷嘴出口截面流量振荡的传递函数, 图 7 为计算的传递函数幅频特性曲线。

从图 7 可以看出, 喷注器压降越大, 由燃烧室压力振荡引起的喷嘴出口流量振荡相对振幅反

而越小。这与文献7中内容相吻合:提高低频稳定性的最简单方法就是提高喷注器单元的压降。

## 5 结论

(1) 当燃烧室内存在压力振荡,将引起喷嘴出口截面的流量振荡。燃烧室存在压力振荡时,在大部分频率区间上都会在供应系统中产生振荡响应。同时会在一些频率点上对振荡产生抑制作用。

(2) 工况参数对喷嘴出口流量振荡有很大影响。燃烧室稳态压力越小、喷注器压降越大,由燃烧室压力振荡引起的喷嘴流量振荡就越小。

(3) 敞口和收口型离心喷嘴对燃烧室压力扰动引起喷嘴出口截面流量振荡的影响规律基本相同。出口流量振荡变化趋势基本相同,发生谐振的频率基本相同,但收口型离心喷嘴在频率区间上振幅相对较小。

## 参考文献:

- [1] V. G. 巴扎罗夫 著. 任汉芬, 孙纪国 译. 液体喷嘴动力学 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1997.
- [2] Andreev A, Bazarov V, Dushkin A, et al. Dynamics of Gas-Liquid Injector [M]. Moscow, Mashinostroenie, 1991.
- [3] Bazarov V, Yang Vigor. Liquid-Propellant rocket engine inject dynamics [J]. Journal of propulsion power, Vol.14. No.5, September-October 1998, pp.797-806.
- [4] 张向阳. 液体离心喷嘴动态特性理论分析与数值模拟 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
- [5] 曹泰岳. 火箭发动机动力学 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004, 266-276.
- [6] 杨立军, 富庆飞. 喷嘴对供应系统到燃烧室压力振荡传递幅频特性的影响 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 305-310.
- [7] D T Harje 著. 朱宁昌, 张宝炯 译. 液体推进剂火箭发动机不稳定燃烧 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.

(编辑: 王建喜)

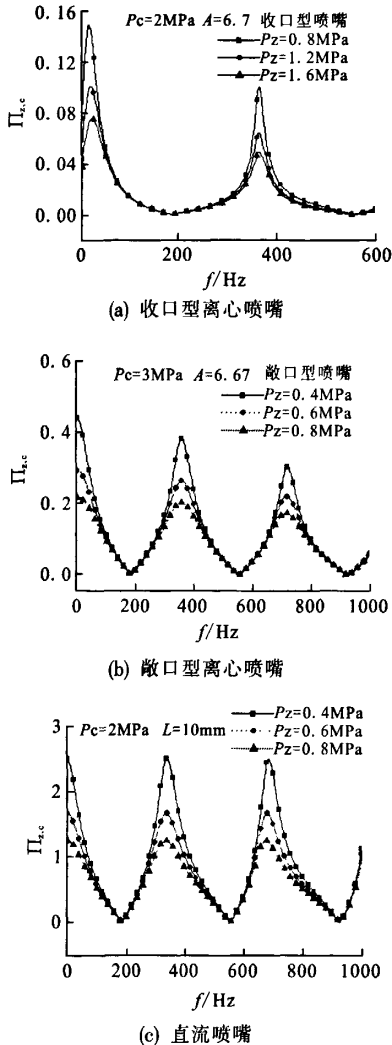


图7 不同喷注器压降下喷嘴出口流量振荡的幅频特性曲线

Fig.7 Effect of injector pressure drop on injector spout flow oscillation dynamic characteristics