

文章编号: 1000-8055(2009)05-1182-05

# 由喷嘴连接的燃烧室到供应系统压力 振荡传递过程研究

杨立军, 富庆飞

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

**摘 要:** 为了研究在压力振荡由液体火箭发动机燃烧室传递到供应系统的过程中喷嘴所起的作用, 从理论上分析了压力振荡由燃烧室到供应系统通过喷嘴的传递过程, 推导了振荡传递过程的传递函数. 讨论带有各种喷嘴的供应系统的动态特性, 对供应系统管路长度、燃烧室压强、喷嘴种类、喷嘴压降及喷嘴结构尺寸对燃烧室压力振荡引起供应系统压力振荡的影响进行了计算, 得到了喷嘴以及工况参数在传递过程中的影响规律.

**关键词:** 液体火箭发动机; 喷嘴; 传递函数; 燃烧室; 供应系统

中图分类号: V434.13

文献标识码: A

## Investigation on pressure oscillation propagation from combustion chamber to pipeline through injector

YANG Li-jun, FU Qing-fei

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of injector on pressure oscillation propagation from liquid rocket engine combustion chamber to pipe-line, the process of pressure oscillation propagation from combustion chamber to pipe-line was theoretically researched in this paper; and the transfer function was also deduced. The dynamic characteristic of pipe-line linked with various injectors was discussed. The influences of pipe-line length, combustion chamber pressure, injector type and configuration on pressure oscillation propagation process were calculated, the influence rule of injector and operating condition parameters on propagation process was gained finally.

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

液体火箭发动机中、低频燃烧不稳定性同高频不稳定性的区别在于: 高频燃烧不稳定性往往与燃烧室内的声振型有关, 而且在高频振荡的情况下, 供应系统通常是可以忽略的。但是对于中、低频燃烧不稳定性, 供应系统是共振系统的一个重要部分。供应系统与燃烧室之间发生耦合, 压

力扰动会通过喷注器在燃烧室和供应系统之间进行传递。因此喷嘴在发动机动态系统中起到非常重要的作用。有关压力扰动在液体火箭发动机供应系统和燃烧室中的传递规律在较多文献中都进行了研究<sup>[1]</sup>, 但是大部分研究并未详细考虑喷嘴的动态特性, 而是对喷嘴做一简化处理。本文在

收稿日期: 2008-04-29; 修订日期: 2008-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(50406007)

作者简介: 杨立军(1970—), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 教授, 研究方向为液体火箭发动机喷雾与燃烧

喷嘴动态特性研究<sup>[2-4]</sup>的基础上, 推导了扰动从燃烧室传递到供应系统过程的传递函数, 并考虑了喷嘴的动力学特性, 为液体火箭发动机喷嘴设计提供指导.

## 1 喷嘴、供应系统及燃烧室间相互作用

如图 1 所示, 喷嘴连接供应系统和燃烧室, 不论是来自供应系统还是燃烧室的压力或流量脉动, 都可以通过调节喷嘴的动态特性, 来切断燃烧室内和供应系统、燃烧室的耦合, 并在一定程度上抑制不稳定燃烧的发生.

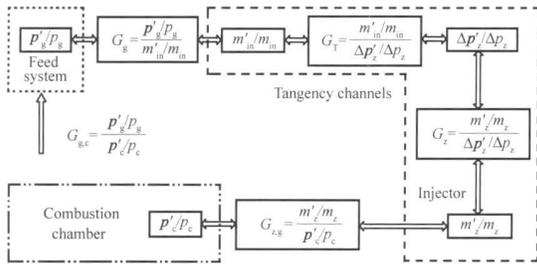


图 1 喷嘴与供应系统以及燃烧室相互作用关系

Fig. 1 Interaction of injector with supply system and combustion chamber

$G_g = (p'_g/p_g)/(m'_{in}/m_{in})$  —— 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;

$G_T = (m'_{in}/m_{in})/(\Delta p'_z/\Delta p_z)$  —— 喷嘴进口无量纲流量振荡与喷嘴无量纲压降之比;

$G_{g,c} = (p'_g/p_g)/(p'_c/p_c)$  —— 供应系统无量纲压力振荡与燃烧室无量纲压力振荡之比(通过喷嘴联系的).

式中  $G$  为传递函数,  $p$  代表压强,  $m$  代表流量; 下标  $g$  表示供应系统,  $z$  表示喷嘴,  $c$  表示燃烧室,  $in$  表示喷嘴进口,  $T$  表示离心喷嘴切向通道; ' 代表振荡量.

## 2 燃烧室到供应系统压力振荡传递分析

燃烧室的压力振荡引起喷嘴的流量振荡, 离心喷嘴的流量振荡引起喷嘴切向进口的流量振荡进而引起供应系统的压力振荡. 由图 1 可知

$$\frac{p'_g}{p_g} = G_g \frac{m'_{in}}{m_{in}} \quad (1)$$

而离心喷嘴切向进口流量的振荡是由喷嘴压降的振荡引起的.

$$\frac{m'_{in}}{m_{in}} = G_T \frac{\Delta p'_z}{\Delta p_z} \quad (2)$$

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.

$$\Delta p'_z = p'_g - p'_c \quad (3)$$

无量纲形式:

$$\frac{\Delta p'_z}{\Delta p_z} = \frac{p'_g}{p_g} \frac{p_g}{\Delta p_z} - \frac{p'_c}{p_c} \frac{p_c}{\Delta p_z} \quad (4)$$

联立(1)、(2)、(4)得

$$\frac{p'_g}{p_g} = G_g G_T \left[ \frac{p'_g}{p_g} \frac{p_g}{\Delta p_z} - \frac{p'_c}{p_c} \frac{p_c}{\Delta p_z} \right] \quad (5)$$

最终可解出

$$G_{g,c} = \left( \frac{p'_g}{p_g} \right) \left( \frac{p'_c}{p_c} \right) = \left( \frac{p_c}{\Delta p_z} \right) \frac{G_g G_T}{G_g G_T \left( \frac{p_g}{\Delta p_z} \right) - 1} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 燃烧室压力振荡引起供应系统压力振荡的传递函数  $G_{g,c}$  取决于离心喷嘴切向通道流量振荡的传递函数  $G_T$ 、供应系统的传递函数  $G_g$ 、喷嘴压降  $\Delta p_z$ 、供应系统压力  $p_g$  和燃烧室压力  $p_c$ . 从式(6)还发现燃烧室压力振荡引起供应系统压力振荡的传递函数  $G_{g,c}$  与离心喷嘴的整体传递函数  $G_z$  无关, 是由于离心喷嘴中心存在气涡, 气涡与燃烧室相通, 因此燃烧室内的压力振荡仅通过离心喷嘴切向通道传递到供应系统.

通过式(6)分析若燃烧室压力产生振荡, 供应系统压力振荡是否会发生无限制增长.

若供应系统压力振荡发生无限制增长, 即  $G_{g,c} \rightarrow \infty$ , 从式(6)可以看出, 只有满足下面的条件才能发生.

$$G_g G_T \left( \frac{p_g}{\Delta p_z} \right) = 1 \quad (7)$$

因为  $G_g, G_T$  是复数, 因此只有以下条件才能满足式(7).

$$\text{Re} \left( G_g G_T \right) = \text{Re} G_g \text{Re} G_T - \text{Im} G_g \text{Im} G_T = \frac{\Delta p_z}{p_g} \quad (8)$$

$$\text{Im} \left( G_g G_T \right) = \text{Im} G_g \text{Re} G_T + \text{Re} G_g \text{Im} G_T = 0 \quad (9)$$

以上式(8)和式(9)就是燃烧室内扰动对供应系统压力振荡的激励条件.

以一个理想供应直管路为例. 供应系统管路长为  $L$ , 一端与贮箱连接, 另一端与喷嘴连接. 对于这样的供应系统其传递函数为<sup>[5]</sup>

$$G_g = -i \tan \frac{\omega L}{a} \quad (10)$$

式中  $a$  为声速,  $\omega$  代表振荡角频率,  $L$  代表长度. 可以看出  $\text{Re} G_g = 0$ , 结合式(9), 得

$$\text{Im} G_g \cdot \text{Re} G_T = 0 \quad (11)$$

由于  $Re G_T$  总是大于 0 的, 因此要满足水力动力学不稳定条件必须同时满足两个要求

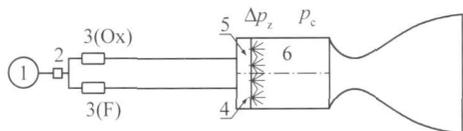
$$\text{Im } G_g = 0 \quad (12)$$

$$\text{Im } G_g \cdot \text{Im } G_T = -\frac{\Delta p_z}{p_g} \quad (13)$$

从以上两式中可以看出, 同时满足这两个要求是不可能的. 因此, 在所研究的理想直管路供应系统内压力振荡的振幅不可能无限的增长. 但这并不意味着, 在  $Re G_g \neq 0$  的较为复杂供应系统中, 水力动力学不稳定性的情况是不能出现的.

### 3 算例及结果分析

燃烧室压力振荡引起供应系统压力振荡的传递函数反映了供应系统对燃烧室压力振荡的响应, 而其中喷嘴动态特性的影响如何, 下面结合算例进行编程计算. 以图 2 所示的双组元挤压式液体火箭发动机为例, 将集液腔看成是供应系统的一部分, 假设与供应系统连接的管路长度为 2 m. 以其中一路为研究对象, 对工况、喷嘴形式和结构参数等对传递函数的影响规律进行讨论.



1 蓄压器; 2 减压阀; 3 推进剂储箱;  
4 喷注器; 5 集液腔; 6 燃烧室

图 2 双组元挤压式液体火箭发动机系统简图  
Fig. 2 Schematic of LRE system

#### 3.1 直流喷嘴的影响

通过喷嘴动力学的研究可知, 直流喷嘴的动力学特性相对简单, 长径比大的直流喷嘴对振荡的敏感性较小<sup>[3]</sup>, 这是因为粘性耗散作用, 长度越长对振荡的衰减越强. 液体火箭发动机中撞击式喷嘴器的喷孔多采用直流喷注单元, 假设喷孔直径为 1 mm, 燃烧室压强 4 MPa, 变换喷孔长度以研究直流喷注单元长径比的变化对传递函数的影响. 计算结果如图 3 所示.

从计算结果看出, 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, 供应系统压力振荡相对振幅越小; 在大于此频率时, 长径比越大, 供应系统压力振荡相对振幅越大.

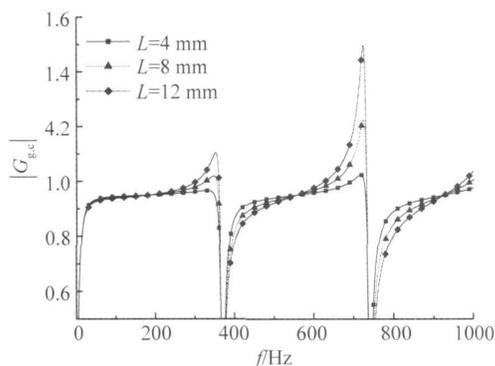


图 3 与直流喷嘴连接的供应系统内压力振荡幅频特性  
Fig. 3 Pipe-line system dynamic characteristic linked with jet injector

#### 3.2 离心喷嘴的影响

由喷嘴动力学研究可知, 几何特性系数  $A$  对离心喷嘴动力学特性有很大影响.  $A$  值越大, 由压力振荡引起的离心喷嘴流量振荡相对振幅越小. 因此几何特性系数  $A$  对振荡从燃烧室到供应系统传递函数有一定影响, 设计算例进行计算, 算例喷嘴结构参数见表 1.

表 1 离心喷嘴结构参数

Table 1 Configuration parameter of swirl injector

几何特性参数 $A$	2.6	6.7	15
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	4	8
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

计算结果如图 4 所示. 从图中可以看出, 当燃烧室存在压力振荡时, 供应系统在大部分频率区间上都会产生较大的压力振荡. 但在某些频率附

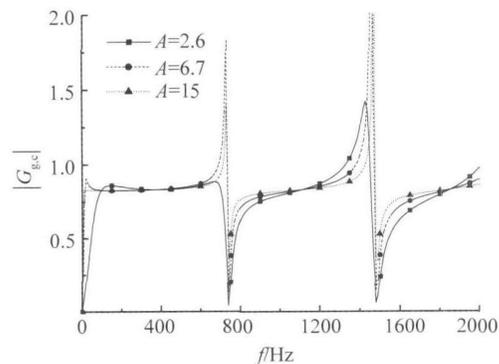


图 4 连接不同离心喷嘴的供应系统压力振荡幅频特性  
Fig. 4 Pipe-line system dynamic characteristic linked with different swirl injector

近(例如  $f = 750, 1500 \text{ Hz}$ ) 可以看到谐振峰值和下凹值. 每两个振荡抑制的频率之间存在一个频率, 在小于此频率时, 几何特性系数越大, 传递函数幅值越大; 在大于此频率时, 几何特性系数越大, 传递函数幅值越小.

为了对喷嘴压降等工况参数对振荡传递函数的影响规律进行研究, 以长径比为 10 的直流喷嘴、几何特性系数  $A$  为 7.2 的离心喷嘴这两种喷嘴为算例, 计算喷嘴压降、燃烧室稳态压强和供应系统长度对由燃烧室到供应系统压力振荡传递函数的影响. 算例参数见表 2.

表 2 工况参数

Table 2 Operating mode parameter

直流喷嘴	$d = 1 \text{ mm}, L/d = 10$			
收口型离心喷嘴	$A = 7.2$			
燃烧室压强/MPa	2	3	4	5
喷嘴压降/MPa	0.8	1.2	1.6	2

### 3.3 喷嘴压降的影响

图 5 为不同喷嘴器压降下 ( $p_c = 4 \text{ MPa}$ ) 燃烧室压力振荡传递到供应系统的传递函数幅频特性

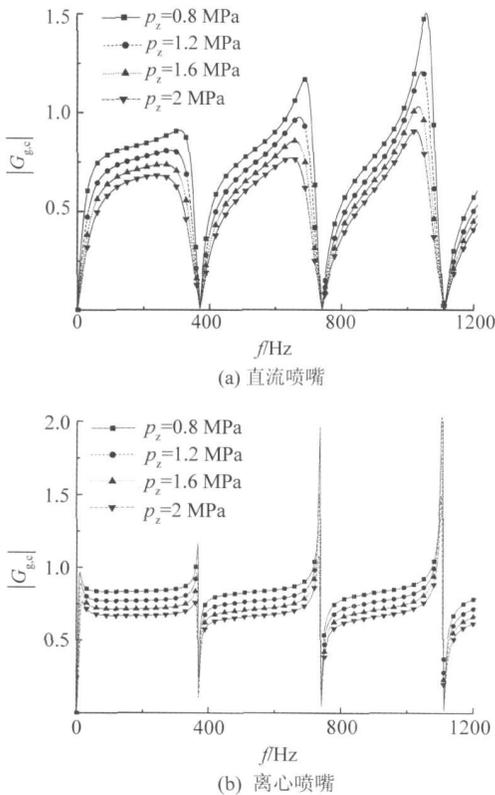


图 5 不同喷嘴器压降下的供应系统压力振荡幅频特性  
Fig. 5 Effect of injector pressure drop on pipe-line dynamic characteristic

曲线. 从图中可以看出, 喷嘴器压降越大, 传递函数的幅值反而越小. 而在实际液体火箭发动机设计时, 提高低频稳定性的最简单方法也就是提高喷嘴器单元的压降<sup>[5]</sup>. 喷嘴器压降越大, 供应系统对振荡的敏感性越低, 从而在一定程度上切断了供应系统和燃烧室之间的耦合.

### 3.4 燃烧室稳态压强的影响

图 6 为不同的燃烧室稳态压力下(喷嘴压降  $p_z = 0.8 \text{ MPa}$ ) 连接直流喷嘴、收口型离心喷嘴的燃烧室到供应系统的压力扰动传递函数幅频特性曲线.

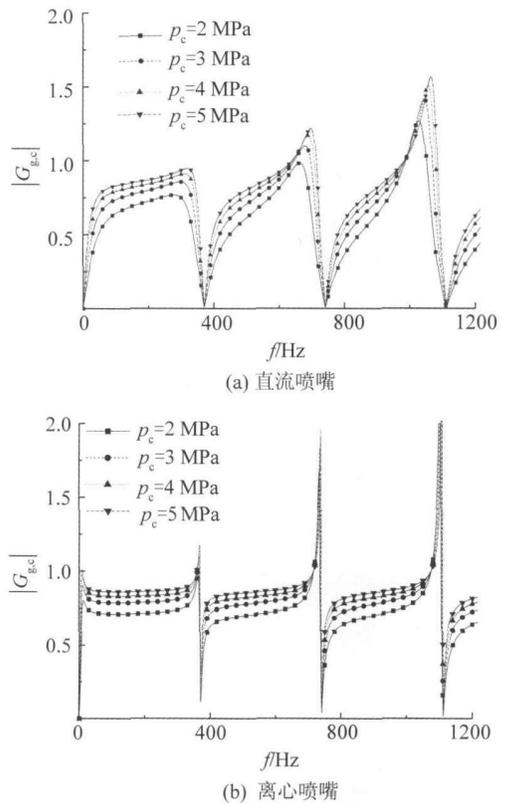


图 6 不同燃烧室稳态压力下的供应系统压力振荡幅频特性

Fig. 6 Effect of combustion chamber pressure on pipe-line dynamic characteristic

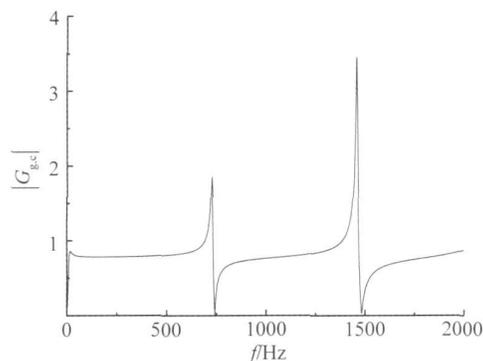
从计算结果看出, 不论使用的是直流喷嘴还是收口型离心喷嘴, 随燃烧室稳态压力增大, 由燃烧室压力振荡引起的供应系统压力振荡的相对振幅随之增大.

### 3.5 供应管路长度的影响

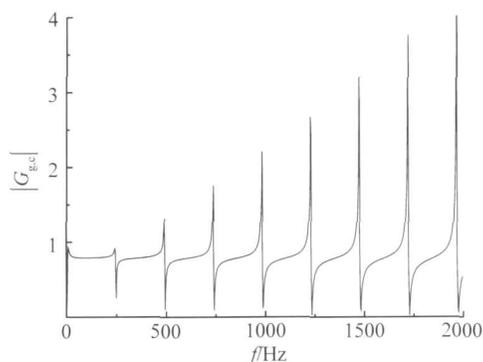
以上的算例都是在给定供应系统管路长度  $L = 2 \text{ m}$  的情况下进行计算的, 下面对不同供应系

统管路长度对由燃烧室压力振荡引起供应系统压力振荡的影响规律进行计算。

计算结果如图7所示,从图中可以看出,随着供应系统管路长度的增加,供应系统内出现压力振荡谐振的频率点随之增多。可以看出在出现振荡幅度抑制的频率点同时有谐振峰值出现,而对于直管路这样的供应系统而言,在谐振时其传递函数虚部等于零,即  $\tan(\omega L/a) = 0$ , 因此可以计算出振荡抑制点的频率为  $f = \omega/2\pi = ka/2L$ , ( $k=1, 2, \dots$ )。



(a) 供应管路长度  $L=1$  m



(b) 供应管路长度  $L=3$  m

图7 不同供应系统管路长度的供应系统压力振荡幅频特性

Fig. 7 Effect of pipe-line length on pipe-line dynamic characteristic

## 4 总结

1) 喷嘴连接着燃烧室和供应系统,这三者的

动力学特性是相互影响的。当燃烧室内存在压力振荡,将通过喷嘴引起供应系统内的压力振荡,即看作燃烧室压力振荡引起带喷嘴的供应系统的振荡。

2) 当燃烧室内存在压力振荡,通过喷嘴将引起供应系统内的压力振荡。在大部分频率区间上都会在供应系统中产生振荡的响应。同时会在一些频率点上对振荡产生极大的抑制作用。

3) 工况参数对供应系统内压力振荡有很大的影响。燃烧室稳态压力越大,喷嘴压降越小,供应系统内的压力振荡相对振幅越大。

4) 在相同的工况参数下,喷嘴结构参数对传递函数的影响规律是:在整个频率区间上每两个相邻的振荡抑制的频率点之间存在一个频率,在小于此频率时,具有较大几何特性系数的离心喷嘴或较小长径比的直流喷嘴,供应系统压力振荡相对振幅越大;在大于此频率时,情况与之相反。但离心喷嘴几何特性参数  $A$  的影响较小。

## 参考文献:

- [1] 张育林,刘昆,程谋森.液体火箭发动机动力学理论与应用[M].北京:科学出版社,2005:96-155.
- [2] 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硬性[J].航空动力学报,2008,23(2):305-310.  
YANG Lijun, FU Qingfei. Effect of injector on pressure oscillation amplitude-frequency characteristics from pipeline to combustion chamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 305-310. (in Chinese)
- [3] Bazarov V G, Yang V. Liquid-propellant rocket engine injector dynamics[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 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.  
ZHANG Xiangyang. Theoretical analysis and numerical investigation of liquid swirl injectors dynamics[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [5] Harrj D T, Readon F H. 液体推进剂火箭发动机不稳定燃烧[M].朱宁昌,张宝炯,译.北京:国防工业出版社,1980.