

文章编号: 1000-8055(2008)02-0305-06

喷嘴对供应系统到燃烧室压力振荡传递幅频特性的影响

杨立军, 富庆飞
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 从理论上分析了压力振荡由供应系统到燃烧室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燃烧室的动态特性, 对供应系统、燃烧室压强、喷嘴种类及喷嘴结构尺寸对供应系统压力振荡引起燃烧室压力振荡的影响进行了计算, 得到了喷嘴在传递过程中的影响规律.
关 键 词: 航空、航天推进系统; 液体火箭发动机; 喷嘴; 传递函数; 供应系统; 燃烧室
中图分类号: V434.13 **文献标识码:** A

Effect of injector on pressure oscillation amplitude-frequency characteristics from pipeline to combustion chamber

YANG Li-jun, FU Qing-fei
(School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The process of pressure oscillation propagation from pipe-line to combustion chamber was theoretically researched in this paper; the transfer function was also deduced. The dynamic characteristic of combustion chamber linked with various injectors was discussed. The influence of pipe line pressure, combustion chamber pressure, injector type and configuration on pressure oscillation propagation process of pipe-line was calculated, so the influence rule of injector on propagation process was gained.

Key words: aerospace propulsion system; liquid rocket engine; injector; transfer function; pipe line; combustion chamber

符号说明

m —— 流量, kg/s
 a —— 声速, m/s
 ω —— 振荡频率, Hz
 Δp —— 压降, MPa
 G —— 传递函数
 L —— 拉普拉斯变换
 τ —— 时间常数, s

τ_{conv} —— 转化时间, s
 τ_{stay} —— 停留时间, s
 k —— 比热比.

下标说明:

g —— 供应系统
 z —— 喷嘴
 c —— 燃烧室

上标说明:

' —— 振荡量

— 无量纲量

液体火箭发动机是一个复杂的动态工作系统,由于喷嘴在发动机中控制着推进剂的喷注流量,在发动机整个系统中的任何微小振荡或扰动,都会直接或间接的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到非常重要的作用.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^[1].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的影响,但是不同动态特性的喷嘴对燃烧稳定性的影响规律还没有定量的评价.本文在喷嘴动态特性研究^[2-6]的基础上,通过理论分析,得到喷嘴在供应系统到燃烧室扰动传递过程中的作用,为液体火箭发动机喷嘴的研制提供指导.

1 喷嘴、供应系统及燃烧室间相互作用

液体火箭发动机喷嘴通过集液腔与供应系统相连,在燃烧室内进行喷雾燃烧,因此供应系统和燃烧室中的扰动传递都是通过喷嘴来实现,以离心喷嘴为例,传递环节如图 1 所示.

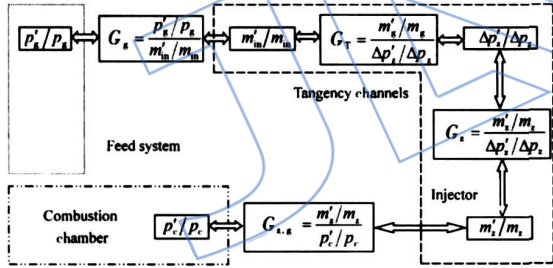


图 1 喷嘴与供应系统以及燃烧室相互作用关系
Fig. 1 Interaction between injector, combustion chamber and supply system

$G_z = (m_c'/m_c)/(\Delta p_z'/\Delta p_z)$ ——喷嘴无量纲流量振荡与喷嘴无量纲压降之比

$G_{cg} = (p_c'/p_c)/(p_g'/p_g)$ ——燃烧室无量纲压力振荡与供应系统无量纲压力振荡之比(通过喷嘴联系的)

$G_{cz} = (p_c'/p_c)/(m_c'/m_c)$ ——喷嘴无量纲流量振荡与燃烧室无量纲压力振荡之比

2 供应系统到燃烧室压力振荡传递

在液体火箭发动机中,供应系统的压力振荡引起喷嘴进口的压力振荡,进一步引起喷嘴的流

量振荡,喷嘴出口处的流量振荡激起了燃烧室中的压力振荡

$$p_c'/p_c = G_{c,z} m_c'/m_c \quad (1)$$

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

$$m_c'/m_c = G_z \Delta p_z'/\Delta p_z \quad (2)$$

喷嘴压降振荡是供应系统压力振荡和燃烧室压力振荡之差.

$$\Delta p_z' = p_g' - p_c' \quad (3)$$

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)~(3)得

$$p_c'/p_c = G_{c,z} G_z \left(\frac{p_g'}{p_g} \frac{p_g'}{\Delta p_z} - \frac{p_c'}{p_c} \frac{p_c'}{\Delta p_z} \right) \quad (5)$$

$$p_g' = p_c' + \Delta p_z' \quad (6)$$

可解出

$$G_{c,z} = \frac{p_c'}{p_c} \frac{p_g'}{p_g} = \frac{(\Delta p_z' + p_c')}{\Delta p_z'} \cdot \frac{G_{c,z} \cdot G_z}{1 + G_{c,z} \cdot G_z \cdot (p_c'/\Delta p_z')} \quad (7)$$

从式(7)中可以看出,供应系统中压力振荡对燃烧室压力振荡的影响取决于喷嘴的传递函数 G_z 、喷嘴出口流量振荡对燃烧室压力振荡的传递函数 $G_{c,z}$ 、喷嘴压降 Δp_z 和燃烧室室压 p_c .

喷嘴的动态传递函数 $G_z^{[2-3]}$ 在相关文献中已经开展了研究.喷嘴出口流量振荡引起燃烧室压力振荡的过程非常复杂,精确地描述燃烧室内传递函数 $G_{c,z}$ 具有很大的难度.

本文选择的是具有集中参数的 LRE 系统的燃烧室作为研究对象,由文献[1]可知,在推进剂组元比恒定及等温的场合下,燃烧室的线性化方程可以归结为

$$\tau_c \frac{dp_c'}{dt} + dp_c' = \overline{m}_c(t - \tau_{conv}) \quad (8)$$

对式(8)在零初始条件下进行 Laplace 变换,得

$$(\tau_c s + 1) L[p_c'] = \exp(-s\tau_{conv}) L[\overline{m}_c] \quad (9)$$

由此可得具有集中参数的火箭发动机燃烧室的传递函数为

$$G_{c,z} = \exp(-s\tau_{conv})/(\tau_c s + 1) \quad (10)$$

本文中燃烧室传递函数采用的是作为具有集中参数的 LRE 系统的燃烧室,此时应在较低频范围内考虑液体火箭发动机的动态特性.当扰动的振荡频率较高时,应采用具有分布参数的燃烧室的传递函数

$$G_{c,z} = \frac{1}{\frac{s\tau_{\text{stay}}}{k} + 1 + \frac{k-1}{2k}[1 - \exp(-s\tau_{\text{stay}})]}$$

(11)

停留时间 τ_{stay} 与燃烧室的特征长度、比热比函数 $\Gamma(k)$ 以及特征速度有关。

3 算例及结果分析

根据前面得到的供应系统压力振荡所引起的燃烧室压力振荡的传递函数, 结合算例进行编程计算不同参数对传递函数影响规律。选双组元液体火箭发动机, 以其中一路供应系统为研究对象, 推进剂为煤油。假设供应系统出口有压力振荡, 将通过喷嘴的传递引起燃烧室内的压力振荡, 将集液腔看成是供应系统的一部分。

3.1 直流喷嘴的影响

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 1 mm, 重点研究喷孔长度与直径的比值变化对燃烧室内压力振荡的影响。图 2 为连接不同长径比直流喷嘴的燃烧室内压力振荡的幅频特性曲线。从计算结果看出, 长径比越大, 直流喷嘴的燃烧室内压力振荡的相对振幅越小。这可以解释为喷嘴越长, 扰动在喷嘴内传播时衰减越多, 因此供应系统压力振荡通过喷嘴传递到燃烧室时, 燃烧室内的压力振荡相对振幅越小。

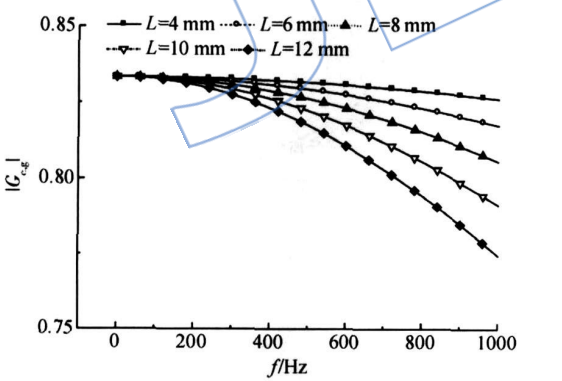


图 2 直流喷嘴燃烧室的压力振荡幅频特性
Fig.2 Combustion chamber dynamic characteristic linked with jet injector

3.2 收口型离心喷嘴的影响

影响收口型离心喷嘴动态特性的结构参数较多, 本文仅计算几何特性系数 A 值的变化对振荡从供应系统到燃烧室传递过程影响规律, 算例见表 1。

图 3 为连接不同几何特性系数 A 的收口型离心喷嘴的燃烧室内压力振荡的相对振幅, 从计算结果可以看出, 在发生谐振时, 所连接的离心喷嘴的几何特性系数 A 值越大, 燃烧室内压力振荡的相对振幅亦越大。但在振荡频率高于 60 Hz 左右时, 几何特性系数越大, 燃烧室内压力振荡的相对振幅越小。

表 1 收口型喷嘴参数
Table 1 Closed swirl injector

结构参数	算 例		
几何特性系数 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	75	75	75
喷口半径/mm	1	1	1
喷口长度/mm	25	25	25

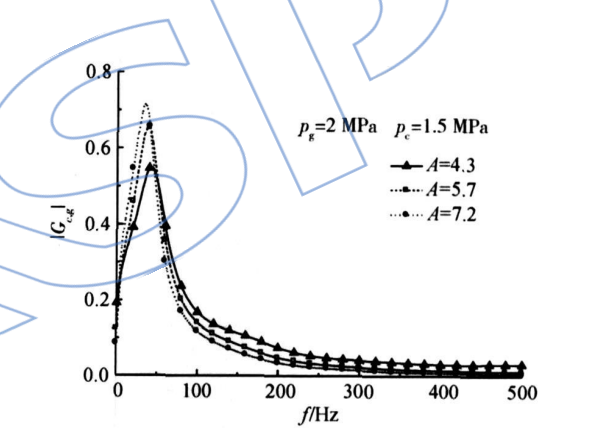


图 3 收口型离心喷嘴燃烧室的压力振荡幅频特性
Fig.3 Combustion chamber dynamic characteristic linked with closed swirl injector

3.3 敞口型离心喷嘴的影响

敞口型离心喷嘴计算算例如表 2 所示。图 4 为连接具有不同几何特性系数 A 的敞口型离心喷嘴的燃烧室内的压力振荡的相对振幅。

表 2 敞口型喷嘴参数
Table 2 Open- end swirl injector

结构参数	算 例		
几何特性系数 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	75	75	75
喷口半径/mm	2.8	3.5	4.2
喷口长度/mm	25	25	25

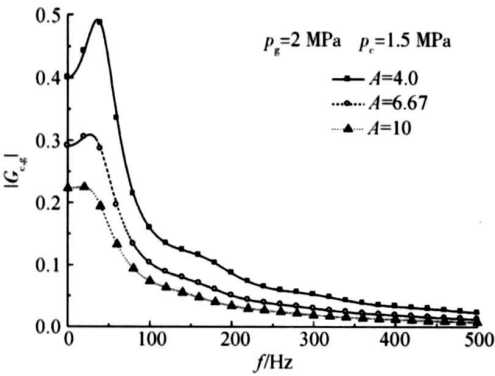


图 4 敞口型离心喷嘴燃烧室的压力振荡幅频特性

Fig. 4 Combustion chamber dynamic characteristic linked with open end swirl injector

从计算结果看出, 所连接的敞口型离心喷嘴几何特性系数 A 值越大, 燃烧室内压力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, 旋流腔内液体旋涡表面振幅会降低, 从而导致喷嘴出口流量振幅越小, 由此引起的燃烧室内压力振荡的相对振幅因此也会变小.

3.4 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系数 A 值相同. 图 5 所示为收口型和敞口型离心喷嘴的发动机系统中, 燃烧室对供应系统压力扰动的动态响应. 从图 5 可以看出, 敞口型和收口型离心喷嘴对扰动从供应系统到燃烧室的传递的影响规律基本相同. 由文献[34]喷嘴动力学的研究可知, 在相同工况和结构参数下, 敞口型离心喷嘴出口的流量振荡相对振幅与收口型离心喷嘴出口的流量振荡相对振幅相差不大. 因此, 这两种喷嘴对压力扰动从供应系统到燃烧室的传递的影响规律基本相同.

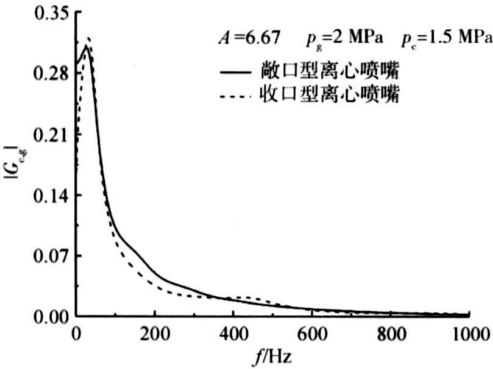


图 5 连接不同结构喷嘴燃烧室压力振荡幅频特性

Fig. 5 Combustion chamber dynamic characteristic linked with different injector type

以上所研究的是喷嘴结构及参数对由供应系统引起燃烧室压力振荡过程的影响, 下面在确定长径比为 10 的直流、几何特性系数 A 为 6.7 的收口型和敞口型等三个喷嘴的基础上, 计算喷嘴压降、燃烧室稳态压强对由供应系统到燃烧室压力振荡传递过程的影响. 算例参数见表 3.

表 3 工况参数

Table 3 Operating mode parameter				
结构参数	算 例			
直流喷嘴	$d=1\text{ mm}, L/d=10$			
收口型离心喷嘴	$A=6.67$, 其它同表 1			
敞口型离心喷嘴	$A=6.67$, 其它同表 2			
燃烧室压强/MPa	1	2	3	4
喷嘴压降/MPa	0.8	1.2	1.6	2

3.5 喷嘴压降的影响

在燃烧室压强取 $p_c=2\text{ MPa}$ 情况下, 计算不同喷嘴压降下燃烧室内压力振荡相对振幅频率特性曲线, 计算结果见图 6. 由计算结果可以看出, 喷嘴压降越大, 燃烧室压力振荡相对振幅反而越小. 文献[7]指出, 提高低频稳定性的最简单方法就是提高喷嘴单元的压降. 这种改变会减少供应系统对振荡的敏感性, 因而减少了整个发动机系统对振荡的敏感性.

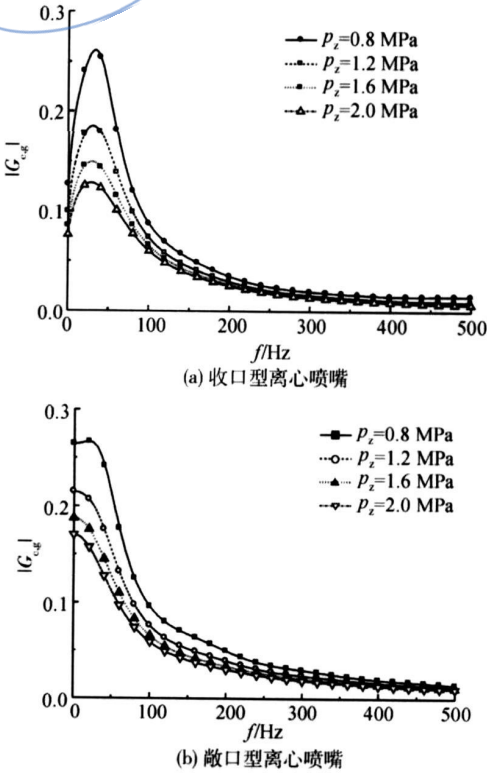


图 6 不同喷嘴压降下的燃烧室压力振荡幅频特性

Fig. 6 Effect of injector pressure drop on combustion chamber dynamic characteristic

3 6 供应系统稳态压强的影响

以几何特性系数 $A=6.7$ 的收口型和敞口型离心喷嘴为例, 改变供应系统压强, 计算供应系统压强振荡引起燃烧室压强振荡的传递函数, 图 7 为计算的传递函数幅频特性曲线. 从计算结果可以看出, 供应系统压力对传递函数的幅频特性具有一定影响: 随着供应系统压力的升高, 由供应系统压力振荡引起的燃烧室压力振荡的幅值也呈升高趋势. 而且在较低频率时, 燃烧室压力振荡的响应振幅较高. 在较高频率下燃烧室对供应系统的压力振荡响应较为微弱. 并且燃烧室对供应系统的压力扰动在低频时出现谐振, 由于管路较长, 所以其谐振频率低一些.

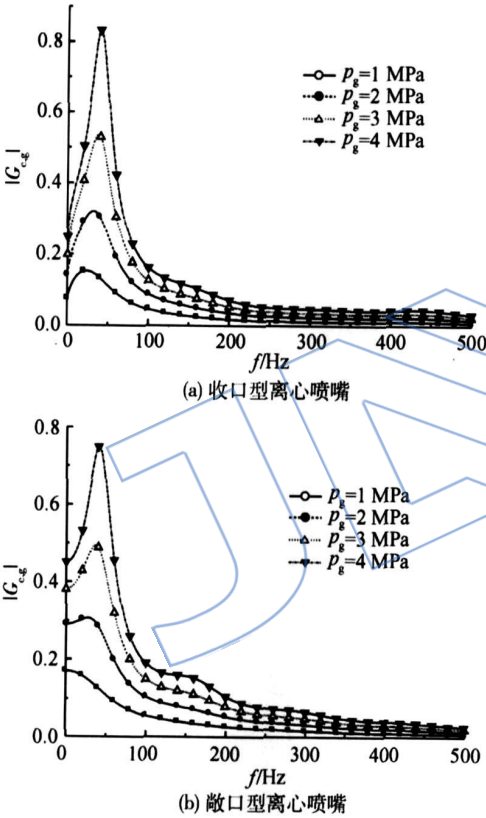


图 7 不同供应系统稳态压力下的压力振荡幅频特性
Fig. 7 Effect of pipe line pressure on combustion chamber dynamic characteristic

3 7 燃烧室稳态压强的影响

图 8 为在不同的燃烧室稳态压力下, 连接敞口型和收口型离心喷嘴的燃烧室对供应系统压力扰动的响应幅频特性曲线.

从计算结果看出, 不论使用的是敞口型还是收口型离心喷嘴, 随燃烧室稳态压力增大, 由供应系统压力振荡引起的燃烧室压力振荡的相对幅

随之增大.

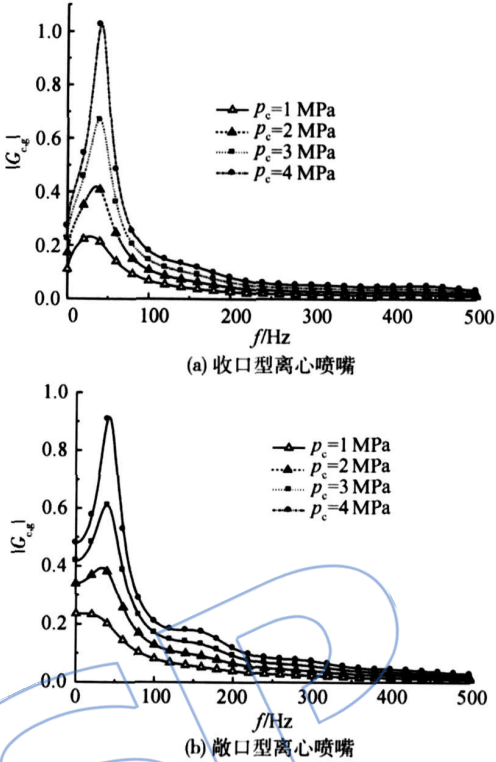


图 8 不同燃烧室稳态压力下的压力振荡幅频特性
Fig. 8 Effect of combustion chamber steady pressure on combustion chamber dynamic characteristic

4 总 结

(1) 喷嘴连接着燃烧室和供应系统, 这三者之间有动态的相互动用. 当供应系统内存在压力振荡, 将通过喷嘴引起燃烧室内的压力振荡, 即看作供应系统压力振荡引起带喷嘴的燃烧室的振荡. 供应系统存在压力振荡时, 会在低频引起燃烧室压力谐振.

(2) 当供应系统内存在压力振荡, 通过喷嘴将引起燃烧室内的压力振荡. 在低频区域, 燃烧室对供应系统的压力振荡有较强的响应, 但在中高频区域燃烧室对供应系统的压力振荡响应微弱.

(3) 工况参数对燃烧室内压力振荡有很大的影响. 供应系统压力越小、燃烧室稳态压力越小、喷注器压降越大, 燃烧室内的压力振荡越小.

(4) 敞口型和收口型离心喷嘴这两种喷嘴对压力扰动从供应系统到燃烧室的传递的影响规律基本相同. 对于收口型喷嘴, 在发生谐振时, 所连接的离心喷嘴的几何特性系数 A 值越大, 燃烧室内压力振荡的相对振幅越大. 但在振荡频率高于一定频率时, 几何特性系数 A 值越大, 燃烧室内

压力振荡的相对振幅越小. 而对于敞口型喷嘴情况则相反, A 值越大, 燃烧室内压力振荡的相对振幅越小.

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] 巴扎罗夫 V G. 液体喷嘴动力学[M]. 任汉芬, 孙纪国, 译. 北京: 航天工业总公司第 11 研究所, 1997.

[3] Bazarov V G, Yang Vigor. Liquid propellant rocket engine injector dynamics [J]. Journal of Propulsion Power, 1998, 14(5): 794 806.

[4] Andreev A, Bazarov V G, Dushkin A, et al. Dynamics of gas-liquid injector[M]. Moscow: Mashinostroenie, 1991.

[5] 杨立军, 富庆飞, 张向阳, 等. 结构参数对敞口型离心喷嘴动态特性的影响[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 864 868.

[6] YANG Lijun, FU Qingfei, ZHANG Xiangyang, et al. Study on influence of configuration parameter of open-end swirl injector on its dynamics [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(6): 864 868.

[7] 富庆飞. 敞口型离心喷嘴动态特性数值模拟研究[D]. 北京: 北京航空航天大学硕士论文, 2007.

[7] Harrie D T. 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.

