

# 液体火箭发动机喷嘴动力学研究进展

杨立军, 富庆飞, 王永涛

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

**摘 要:** 对液体火箭发动机喷嘴动力学研究的有关文献进行了综述, 从喷嘴动力学理论分析和实验研究两方面入手, 对直流式、离心式喷嘴、敞口型离心式喷嘴和气液同轴喷嘴动力学的国内外研究进展进行了全面总结。从目前的研究结果来看, 喷嘴动力学在解决燃烧不稳定方面具有重要意义, 在未来液体火箭发动机研制中将起到更大作用。

**关键词:** 液体火箭发动机; 喷嘴; 动力学; 综述

**中图分类号:** V434.13

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2006) 06-0035-08

## Review of evolvement on dynamics of injector of liquid rocket engine

Yang Lijun, Fu Qingfei, Wang Yongtao

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

**Abstract:** This paper presents the review about theoretical and experimental research on dynamics of injector of liquid rocket engine, and makes a summarization on research progress around the world about dynamics of jet injector, swirl injector, opened swirl injector and coaxial gas/liquid injector. The conclusion of this paper is that injector dynamics shows increasing importance in solving the problem of combustion instability, and it will play an important role in future LRE development.

**Key words:** liquid rocket engine; injector; dynamics; review

符号说明:

$n$  —— 切向通道排数

$r$  —— 液体旋涡的半径

$w$  —— 振荡角频率

$u$  —— 液体的流速

$\rho$  —— 液体的密度

$v$  —— 扰动波的传播速度

收稿日期: 2006-06-15; 修回日期: 2006-07-24。基金项目: 国家自然科学基金资助项目 50406007。

作者简介: 杨立军 (1970—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为火箭发动机喷雾与燃烧。

$n$ —— 切向通道排数	$r$ —— 液体旋涡的半径
$\omega$ —— 振荡角频率	$u$ —— 液体的流速
$\rho$ —— 液体的密度	$v$ —— 扰动波的传播速度
$\Omega$ —— 表面波的振幅	$Q$ —— 液体体积流量
$\Delta p$ —— 压降	$\Pi$ —— 传递函数(或响应函数)

下标:

$a$ —— 轴向分量	$r$ —— 径向分量
$\varphi$ —— 喷嘴	$\Sigma$ —— 总和
$T$ —— 切向通道	$bx$ —— 切向通道入口
$k$ —— 旋流腔	$c$ —— 喷口
$k.3$ —— 旋流腔底部截面	$k.c$ —— 旋流腔的出口截面
$m$ —— 液体旋涡	$mk$ —— 旋流腔底部的液体旋涡

上标:

$-$ —— 相对量	$'$ —— 脉动量
------------	------------

## 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推进剂流量,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的流量变化,进而影响发动机整体稳定性,因此喷嘴在发动机动态系统中起到非常重要的作用。

近年来,喷嘴动力学问题引起了广泛的关注,对喷嘴在液体火箭发动机燃烧室中所起的作用有了更深入的认识,认为喷嘴不仅仅是推进剂燃烧过程的组织者,同时也是燃烧室和供应系统及燃气发生器之间的各种扰动的重要传递环节<sup>[1,2]</sup>。

## 2 喷嘴在发动机动态系统中的作用

如图 1 所示,喷嘴上游通过集液腔与供应系统相连,下游与燃烧室相连,因此供应系统和燃烧室中的所有扰动都会传到喷嘴。可见喷嘴作为液体火箭发动机的重要部件,除了要完成所要求的喷雾和可燃混合物的形成的作用外,同时还起到敏感元件、放大器、相位调节器和激励器的作用,喷嘴作为一动力学系统,以其一些输出参数的脉动和相位的变化对室压脉动做出响应。喷嘴动态特性对燃烧室燃烧过程的稳定性将起到非常重要的作用。在液体火箭发动机系统组件中,用喷注器来控制供应系统耦合不稳定性是最方便的<sup>[3]</sup>,但是由于缺乏对各种喷嘴动力学特性规律的认识和相关数据,使得从喷嘴设计角度来消除不稳定燃烧的设计原则并没有得到统一的认识。

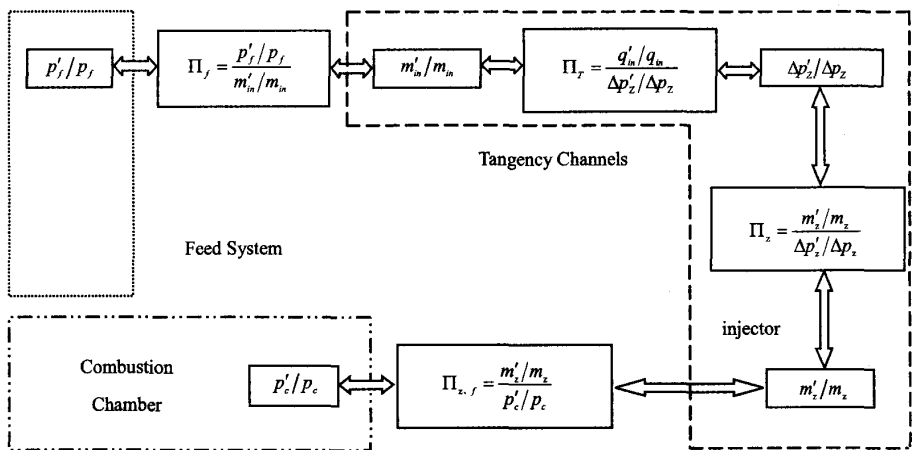


图 1 喷嘴与供应系统和燃烧室相互作用

Fig.1 Dynamic interaction of injector with feed system and combustion chamber

### 3 喷嘴动力学理论研究

俄罗斯学者 Базаров В. Г. 开创了喷嘴动力学的研究工作, 采用控制喷嘴内部流动的无粘流体力学方程, 运用解析方法推导出了喷嘴频率特性方程。对液体喷嘴动力学进行了详细的系统研究, 得出了液体直流、离心式喷嘴各输入、输出参数振幅和相位角的关系, 得到了这些喷嘴动态特性的工程算法<sup>[1]</sup>。

直流式喷嘴频率特性方程为:

$$\Pi = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - i\omega L}{1 + (\omega L/u)^2} \quad (1)$$

离心喷嘴的频率特性较为复杂, 包括进口通道、旋流室及喷口三部分组成, 离心喷嘴频率特性由各部分频率特性的矢量复合而成:

$$\Pi = \left( \frac{Q'}{Q} \right) / \left( \frac{\Delta p'}{\Delta p} \right) = \frac{\bar{R}_k}{a} \frac{\Pi_c \cdot \Pi_{k,II} \cdot \Pi_{bx}}{2\Pi_{bx} (\Pi_{k,III} + \Pi_{k,III}) + 1} \quad (2)$$

式中:

$$\text{切向通道传递函数 } \Pi_{bx} = \frac{1}{2} \frac{1 - i\omega L_{bx}/u_{bx}}{1 + (\omega L_{bx}/u_{bx})^2}$$

$$\text{喷口传递函数 } \Pi_c = (1 - \Pi) e^{-i\omega L_c/u_c}$$

$$\Pi_{k,II} = \frac{\Omega}{r_{mk}} (\text{Re} \bar{\Omega}_{k,II} + i \text{Im} \bar{\Omega}_{k,II})$$

$$\Pi_{k,III} = \frac{\Omega}{r_{mk}} (\text{Re} \bar{\Omega}_{k,III} + i \text{Im} \bar{\Omega}_{k,III})$$

式中,  $\bar{R}_k$  为喷嘴收口系数,  $\bar{R}_k = R_k/R_c$ ;  $a$  为离心喷嘴无量纲系数,  $A^2 \mu^2 = 2(1 - \varphi)^2 / (2 - \varphi)$

文献[4]针对敞口型离心喷嘴的动态特性进行了分析, 考虑了旋流腔内轴向分速对流量振荡的影响, 推导出敞口型喷嘴动态特性的计算公式。

$$\Pi_\varphi = \left( \frac{Q'}{Q} \right) / \left( \frac{\Delta p'}{\Delta p} \right) = \frac{\bar{R}_{bx}^2}{a} \frac{\Pi_{k,II} \Pi_\tau}{2\Pi_\tau (\Pi_{k,III} + \Pi_{k,III}) + 1} \quad (3)$$

式中,  $\bar{R}_{bx}$  为喷嘴旋臂数,  $\bar{R}_{bx} = R_{bx}/R_c$ 。

计算了敞口型和收口型离心喷嘴的动态特性, 见图 2。结果表明: 敞口型喷嘴动态的流量相对振幅约为收口型喷嘴的 1/8 到 1/10, 而且其幅频特性和相频特性变化稳定。

结构参数对敞口型离心喷嘴动态特性影响研究结果表明, 敞口型喷嘴内的流量相对振幅会随振荡频率的增加而下降, 滞后相位角随振荡频率的增大而单调增加。压降越大, 流量相对振幅越大, 相移越小。具有较大离心喷嘴几何特性系数  $A = (R_{bx} \cdot R_c) / (n r_{bx}^2)$  和较长旋流腔的敞口型离心喷嘴可以阻尼掉更多的流量振荡。敞口型喷嘴的振荡滞后相移会随旋流腔长度的增大而线性增大。

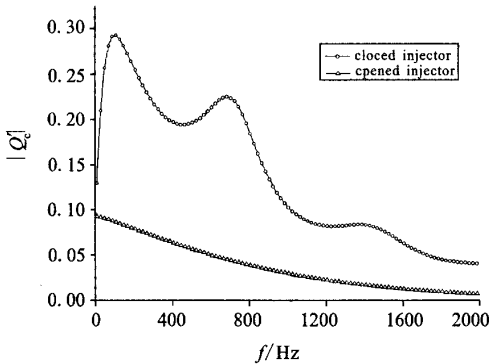


图2 敞口型和收口型离心喷嘴动态特性对比

Fig.2 Dynamics of opened injector and closed injector

文献[5]从理论上对具有多排切向通道的敞口型离心喷嘴的动态特性进行了分析,推导出具有多排切向通道的敞口型离心喷嘴动态特性的计算公式。

$$\Pi_{\varphi} = \frac{Q'_{k.c.}/\Delta p'_{\varphi}}{Q_{k.c.}/\Delta p_{\varphi}} = \frac{1}{2} \frac{\bar{R}_{bx}^2}{a} \sum_{i=1}^n \frac{\Pi_{k.c. II i} \Pi_{\tau i}}{2 \Pi_{\tau i} (\Pi_{k.3 II i} \Pi_{k.3 III i}) + 1} \quad (4)$$

计算了两排、三排切向通道的敞口型离心喷嘴,典型计算结果见图3,计算结果表明,调整切向通道之间的轴向距离,可以使喷嘴滤除一定频率的扰动波。

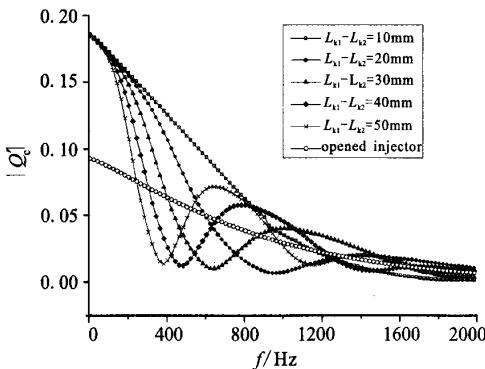


图3 双排敞口型离心喷嘴动力学特性曲线

Fig.3 Dynamics of two rows of tangential channel opened swirl injector

Андреев А.В.<sup>[2]</sup>对气液喷嘴动力学进行了研

究,利用气体和液体喷嘴动态特性的矢量和来计算气液喷嘴的动态特性,阐述了喷嘴内的非定常过程对燃烧稳定性和完全性的影响,并对氢氧补燃发动机燃烧室工作过程的稳定性进行了研究。喷嘴动态特性对工作过程稳定性的影响可能有两种类型:稳态混合参数的变化改变了燃烧室的动态特性,喷嘴的动态特性是构成整个发动机动态特性的一部分;由于非线性效应(不稳定性的干扰等)使燃烧室的动态特性发生变化。对发动机内部工作过程间的图解分析表明,所能认识到的喷嘴的动态特性可以影响工作过程不稳定性。

Орлов В. А.<sup>[6]</sup>研究了喷嘴前腔振荡对气液同轴喷嘴喷雾场液滴流量振荡影响的非定常模型数学模型以及这些振荡振幅随距喷嘴距离的变化。得到了联系气体、液体流量脉动与喷雾场液滴流量脉动的传递函数。气体流量脉动与喷雾场液滴流量脉动传递函数为:

$$\text{低频: } \Pi_{MsPg}(\omega) = \beta \omega L_0 / 3V_g \quad (5)$$

$$\text{高频: } \Pi_{MsPg}(\omega) = \beta V_g / \omega L_0 \quad (6)$$

液体流量脉动与喷雾场液滴流量脉动传递函数为:

$$\text{低频: } \Pi_{MsMl}(\omega) = \left[ 1 + (L_0^2 \omega^2 / 144 V_l^2) \right]^{0.5} \quad (7)$$

$$\text{高频: } \Pi_{MsMl}(\omega) = V_l / \omega L_0 \quad (8)$$

其中: $\beta$ 取决于雾化模型; $L_0$ 为喷雾平均长度; $V_g$ 和 $V_l$ 分别为气体和液体的流速。

文献[7]从控制喷嘴内部流动的基本方程入手应用频率法对直流和离心喷嘴的动态特性进行了数值模拟。具体做法为考虑了流体的压缩性和粘性,将流体力学方程通过拉普拉斯变换转变成频率特性方程,计算结果表明增加压力振荡频率会导致直流和离心式喷嘴流量等参数的振幅降低和相移增大,而增大压降则导致振幅增大和相移降低。相同工况下,增大直流喷嘴长径比或增大离心喷嘴几何特性系数均会导致振幅降低和相移增大,增大离心喷嘴喷口长度只会导致相移增大,对振幅没有影响。计算结果与 Базаров В. Г. 分析结果符合。

陈佐一、王珏等人<sup>[8]</sup>用振荡流体力学方法分

析气液喷嘴内流体振荡的传播规律。黄玉辉等<sup>[9]</sup>对气液同轴喷嘴的自激振荡进行了研究。研究中发现气液同轴式喷嘴在某些工作条件下会产生流体不稳定现象,将引起喷嘴雾化特性和流强分布的周期性变化,产生这种现象的原因是喷嘴环形通道内气流的固有频率与液体喷嘴气流的固有频率相接近,两者的压力脉动通过液膜相互作用产生共振,共振取决于喷嘴环形通道长度与液体喷嘴的长度之比、气流的速度和声速;反压过大时,液体喷嘴气流的固有频率会发生偏移,这种机理被许多热试实验结果所证实。李龙飞等<sup>[10]</sup>基于经典声学 and 振动理论,运用流体力学基本方程描述燃气通道内气体的流动现象。建立了双组元直流离心式气液喷嘴声学特性分析的物理、数学模型。采用了四端网格方法进行了计算,对单喷嘴声学模拟实验结果进行了分析。计算结果表明,合适的通道长度和节流嘴直径对液氧/煤油补燃循环发动机高频燃烧不稳定性有明显的阻尼作用。

## 4 喷嘴动力学的实验研究

在开展喷嘴动力学理论研究的同时,国内外也开展了相应的实验研究工作。由于描述喷嘴动态过程的理论模型含有许多限制其应用的假设,而喷嘴的动力学参数与其诸多未反映在理论模型中的结构特点和使用特点相关,因而实验研究是喷嘴动态特性研究的必要环节。

在文献[1]中详细地介绍了喷嘴动力学实验研究系统。该系统与喷嘴稳态特性研究实验系统的最大的不同点是要能提供带有频率可调的流量振荡的系统供应管路,一般的办法是在供应系统管路上安装脉动流量发生器。通常可以使用电动的或者机械传动的各种类型的振荡器作为在喷嘴前液体通道内产生周期性压力振荡的振荡源。常用的有柱塞式振荡器、套筒式振荡器以及轮盘式振荡器。

喷嘴内部流场的动态参数的测量是实验研究的难点,喷嘴各部分脉动压力可采用小尺寸动态压力传感器进行测量。直接方法可分为感应式、

电容式、压电式和磁致伸缩式等。要求使用的传感器有很高的动态特性、合格的精度和较高的灵敏度。离心喷嘴内部各结构部分的脉动流量测量是研究喷嘴动态特性的主要试验课题之一。目前常规的脉动流量测量方法很难达到理想的效果。包含有可动部件的流量计,其惯性质量限制了动态测量的频宽;电磁流量测量技术对于高达1000Hz的流量脉动,依然难以准确测量其脉动频率;而超声波流量计难以对小管径的流量进行测量。

还有一些间接的脉动流量测量方法。比如对于流体充满管路的离心喷嘴切向通道的脉动流量测量,可以利用管路动态特性分析的方法来研究切向通道内高频脉动信号。管路任意两端面上的压力 $p_1$ 、 $p_2$ 和流量 $Q_1$ 、 $Q_2$ 间的传递关系可用下面的传递矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} \hat{Q}_1 \\ \hat{Q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1(s^*) - M_2(s^*) \\ M_2(s^*) - M_1(s^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p}_1 \\ \hat{p}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,传递矩阵元素 $M_1$ 、 $M_2$ 分别用下式表示,

$$M_1(s^*) = \frac{\cosh \Gamma}{Z_c \sinh \Gamma}$$

$$M_2(s^*) = \frac{1}{Z_c \sinh \Gamma}$$

式中, $\Gamma$ 、 $Z_c$ 分别为管路传播算子和特性阻抗。这样就可以把脉动流量的测量转化为较易测量的压力测量。

离心喷嘴旋流腔和喷口内形成气涡,液体为环形液膜,因此可以运用电阻法、电容法等等测量环形液膜厚度,从而间接测量了旋流腔和喷口内的脉动流量。液膜厚度的测量与流量测量有紧密的关系,研究其特性很有必要。

喷嘴动力学的典型实验<sup>[1]</sup>结果表明,在喷嘴压降振幅保持不变的情况下,随着振荡频率的增高,旋流腔的压降振幅会急剧下降。这证明,随着振荡频率、喷嘴收口系数和几何特性的增大,喷嘴压降振荡量的大部分都发生在切向通道内。对喷嘴不同结构部分的各个过程相互作用的研究表明,同一参数的变化会对各结构部分中振荡的相互作用产生不同的影响。



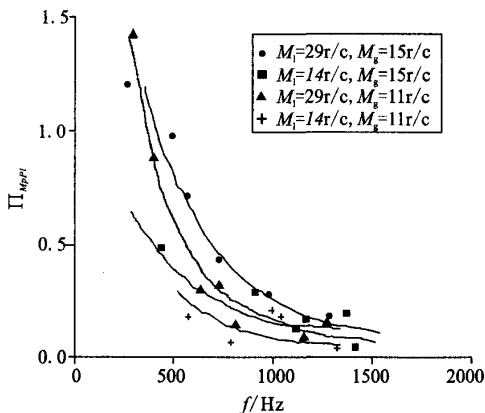


图 6 液路有振荡时气液同轴喷嘴喷雾场液滴流量振荡幅频关系 (大气压条件下)

Fig.6 Amplitude-frequency diagram of droplet mass flow pulsation of coaxial shear injector under atmospheric pressure with pressure pulsation in liquid feed line

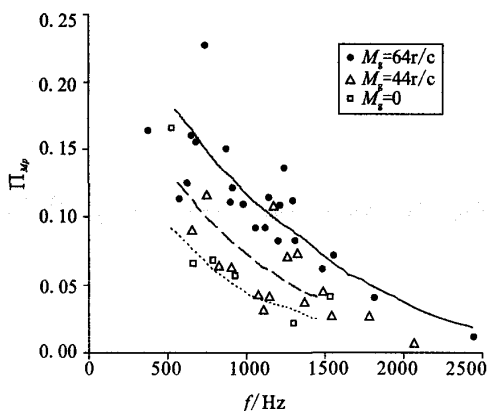


图 7 液路有振荡时气液同轴喷嘴喷雾场液滴流量振荡幅频关系 (反压条件下  $p_{ch}=45\text{atm}$ ,  $L=35\text{mm}$ )

Fig.7 Amplitude-frequency diagram of droplet mass flow pulsation of coaxial shear injector under counter pressure with pressure pulsation in liquid feed line

图 8 为气体通道来流压力振荡引起喷雾场液滴流量振荡的幅频特性曲线, 气体来流振荡所引起的喷雾场液滴流量振荡的幅频特性与液体来流振荡的情况类似, 但液滴流量振幅要比液体来流振荡条件大下。图 9 为液体来流振荡和液滴流量振荡的典型幅相特性图。频率减小时, 气体来流振荡所引起的喷雾场液滴脉动的传递函数接近于零。这是由于气体的流量脉动不会引起通过喷嘴

的液体流量脉动造成的。

对喷雾场液滴直径、速度脉动的幅频特性测量也得到了类似液滴流量相类似的结果。以上这些实验研究结果验证了理论模型的正确性。

文献[11]介绍了我国对喷嘴动力学实验的初步探索研究工作, 研制了频率可调节的流量振荡器和离心喷嘴喷口、旋流室内液膜厚度测量传感器, 建立喷嘴动力学实验研究系统, 合作采用高速动态分析系统对离心喷嘴喷雾场的有关参数进行了测量与研究。

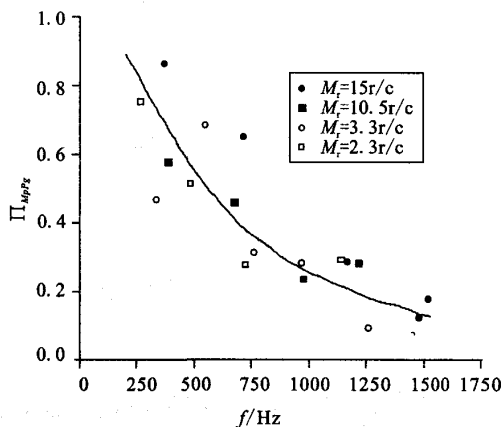


图 8 气路有振荡时气液同轴喷嘴喷雾场液滴流量振荡幅频关系 ( $M_1=14.4r/c$ ;  $p_{ch}=1\text{atm}$ ;  $L=20\text{mm}$ )

Fig.8 Amplitude-frequency diagram of injector with gas pressure pulsation in the feed system

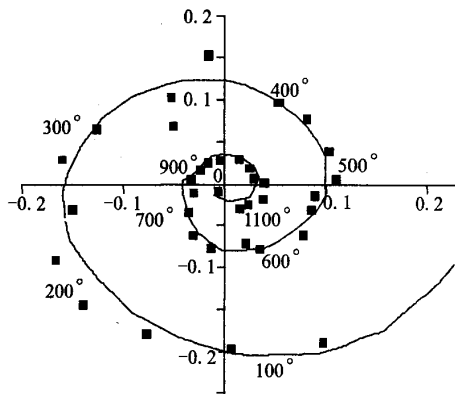


图 9 液体来流振荡时液滴流量振荡的典型幅相特性图

Fig.9 Typical amplitude-phase diagram of droplet mass flow pulsation of injector with liquid pressure pulsation

总之,喷嘴动力学试验研究由于喷嘴尺寸小以及脉动频率高等原因,对传感器的尺寸和响应灵敏度都有较高的要求,造成试验研究有一定的难度,目前其难点主要集中在流量脉动发生器的研制、高频脉动的测量技术,以及喷雾场动态测量。

## 5 结论

综上所述,喷嘴动态特性理论研究目前已经有了些进展,对喷嘴各结构部分动态特性,各种类型喷嘴整体动态特性以及喷雾场动态特性都已经研究得比较清楚了,同时对喷嘴在连接供应系统和燃烧室时它们之间的相互作用关系有了较为深入的了解。动力学理论的发展为认识喷嘴在火箭发动机整体动态特性中起的重要作用奠定了基础。

试验研究方面,在喷注器动态特性的前期研究中由于仪器条件限制,主要集中在喷注器本身的动态特性,而对于喷雾场动态特性的研究远远不够。目前随着仪器技术的发展为喷雾场动态特性的研究提供了可能,这样可以研究供应系统组元振荡和喷雾场之间流量振幅传递变化、流量相位传递变化等动态传递规律,而这个规律是研究喷注器放热量振荡的关键。认识了这个规律就可以通过设计不同动态特性的喷注单元,安排不同喷注单元喷雾场参数(液滴直径、液滴质量)振荡振幅、相位关系,抑制不稳定燃烧的发生。

因此喷注器动力学及喷雾场动态特性研究对于认识不稳定燃烧机理,解决不稳定燃烧的重大技术关键具有重要的意义,希望国家和工业部门

能够大力支持这一方向的研究。

## 参考文献:

- [1] В Г Базаров, Динамика жидкостных форсунок [М]. Москва: Машиностроение, Россия, 1979. г.
- [2] Андреев А В, Базаров В Г, Григорьев С С И др., Динамика газожидкостных форсунок [М]. Москва: Машиностроение, Россия, 1991. г.
- [3] Д Т 哈杰等著.朱宁昌,张宝炯译.液体推进剂火箭发动机不稳定燃烧 [М]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [4] 杨立军等. 敞口型离心喷嘴动力学特性理论分析及研究[C]. 中国宇航学会第五届液体火箭推进专业委员会第一次会议暨研讨会, 2005,11.
- [5] 杨立军等.多排切向通道敞口型离心喷嘴动力学特性研究 [J]. 宇航学报.
- [6] Орлов, В А. Стационарные и динамические характеристики смесеобразования газожидкостных форсунок [R]. ЖРД: Дис. канд. техн. наук: 05. 07. 05 Сергиев Посад, 2001. УДК.629.7.036.54-63, 621.43-013. 4038.8.001.5.
- [7] 杨立军等, 液体喷嘴动态特性数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2004,6.
- [8] 陈佐一, 王鹏飞, 王珏. 用振荡流体力学方法分析气液喷嘴内流体振荡的传播规律[J]. 导弹与航天运载技术, 1998.4.
- [9] 黄玉辉等.气液同轴喷嘴自激振荡的试验现象和声学模型对火箭发动机不稳定燃烧的影响 [J]. 声学学报, 1998.9.
- [10] 李龙飞等. 补燃循环发动机气液同轴式喷嘴声学特性研究[J]. 火箭推进, 2004.12.
- [11] 杨立军等. 液体离心喷嘴喷雾场动态特性的初步研究 [J]. 航空动力学报, 2005,6.

(编辑: 侯 早)