

文章编号: 1000-8055(2007)06-0864-05

结构参数对敞口型离心喷嘴动态特性的影响

杨立军, 富庆飞, 张向阳, 王永涛
(北京航空航天大学, 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 为了研究敞口型离心喷嘴结构参数及工况参数对其动态特性的影响, 以 RD120 预燃室煤油喷嘴的大致结构尺寸为参考, 设计一组算例进行了计算. 计算结果表明: 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, 滞后相移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. 具有较大几何特性 A 和旋流腔长径比的敞口型离心喷嘴可以阻尼掉更多的流量振荡. 敞口型喷嘴的滞后相移会随旋流腔长度的增大而线性增大, 据此可以调节切向入口的轴向间距来滤除某一频率的振荡.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 结构参数; 敞口型离心喷嘴; 动态特性

中图分类号: V434.13

文献标识码: A

Study on influence of configuration parameter of open end swirl injector on its dynamics

YANG Li-jun, FU Qing-fei, ZHANG Xiang-yang, WANG Yong-tao

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the influence of configuration and operating parameters of open end swirl injector on its dynamics, a group of swirl injector models were designed based on the physical dimension of RD120 pre-burner kerosene injector. The calculation result shows that, the amplitude of flow rate of open end swirl injector declines with the increase of fluctuation frequency, and the delay phase increases with fluctuation frequency. The bigger pressure drop means wider amplitude of flow and lower delay phase. The open end swirl injector with larger geometrical characteristic A and length/diameter ratio can dampen more flow rate fluctuations. Since the delay phase increase linearly with the length of vortex chamber, the axial spacing of tangential inlet could be adjusted to filter the fluctuation of a certain frequency.

Key words: aerospace propulsion system; configuration parameter; open end swirl injector; dynamics

符号表

$A = (R_{bx} \cdot R_c) / (nr_{ik}^2)$ 离心喷嘴几何特性系数

$\bar{R}_{bx}$ 喷嘴旋流系数, $\bar{R}_{bx} = R_{bx} / R_c$

ρ 液体的密度

v 扰动波的传播速度

ε 振荡衰减率

μ 流量系数

$\bar{R}_k$ 喷嘴收口系数, $\bar{R}_k = R_k / R_c$

w 液体的流速

λ 扰动波的波长

Q 液体体积流量

收稿日期: 2006-06-27; 修订日期: 2006-12-08

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, 副教授, 博士, 研究领域为火箭发动机喷雾与燃烧. E-mail: yanglijun@buaa.edu.cn

Δp 压降
 K 扰动从切向通道到旋流腔的传递系数
 α 离心喷嘴无量纲系数, $A^2 \mu^2 = 2(1 - \varphi)^2 / (2 - \varphi)$
 Π 传递函数(或响应函数)
下标:
 a 轴向分量, r 径向分量, ϕ 喷嘴, Σ 总和, τ 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, I, II, III 切向通道和旋流腔内的过程之间的相互作用的三种模型^[1]。
上标:
- 相对量, ' 脉动量, * 修正值。

敞口型离心喷嘴是俄罗斯液氧/煤油火箭发动机喷注器的主要结构型式之一, 如 RD120 和 RD170。有关文献指出采用具有较大几何特性系数 A , 加长切向通道和旋流腔的敞口型离心式喷嘴的目的是为了阻尼掉燃烧室或供应系统内的压力振荡^[1-3]。同时文献[1]认为液体火箭发动机喷嘴除了起到喷雾和掺混的作用外, 很大程度上是起着阻尼器和相位调节器的作用, 从而提高燃烧室的燃烧稳定性。文献[4]的研究表明: 敞口型离心喷嘴动态的流动稳定性非常良好, 其流量相对振幅约为同类别收口型喷嘴的 1/8 到 1/10, 并且在整个频率区域波动较小, 但是并没有涉及到喷嘴的工况参数及结构参数对敞口型离心喷嘴的动态特性的影响。本文从理论上分析了敞口型离心喷嘴结构和工况参数对其动态特性的影响, 探索了一些参数的影响规律。

1 敞口型离心喷嘴的动力学模型

敞口离心式喷嘴的特点是喷口直径等于旋流室直径, 文献[4]中给出了计算敞口离心式喷嘴的动态特性的传递函数

$$\Pi_{\phi} = \frac{Q'_{k,c} / \Delta p'_{\phi}}{Q_{k,c} / \Delta p_{\phi}} = \frac{\bar{R}_{bx}^2}{a} \frac{\Pi_{k,cII} \Pi_r}{2 \Pi_r (\Pi_{k,3II} + \Pi_{k,3III}) + 1}$$

其中各个部分的传递函数以及某些中间参数如下:

切向通道

$$\text{Re } \Pi_r = \frac{1}{2(1 + Sh_r^2)};$$
$$\text{Im } \Pi_r = - \frac{Sh_r}{2(1 + Sh_r^2)}$$

旋流腔

$$\text{Re } \Pi_{k,3II} = K_{\Sigma II}^*$$
$$\text{Im } \Pi_{k,3II} = 0$$
$$\text{Re } \Pi_{k,3III} = \frac{\bar{R}_k - a}{R_k} \int_0^1 \cos f(\bar{x}) e^{-\varphi f(\bar{x})} \frac{d\bar{x}}{(1 - \frac{\bar{R}_k - a}{R_k} \bar{x})^3}$$
$$\text{Im } \Pi_{k,3III} = - \frac{\bar{R}_k - a}{R_k} \int_0^1 \sin f(\bar{x}) e^{-\varphi f(\bar{x})} \frac{d\bar{x}}{(1 - \frac{\bar{R}_k - a}{R_k} \bar{x})^3}$$
$$\text{Re } \Pi_{k,cII} = K_{\Sigma II}^* e^{-v \Phi_k / 2\pi} \cos \Phi_k$$
$$\text{Im } \Pi_{k,cII} = - K_{\Sigma II}^* e^{-v \Phi_k / 2\pi} \sin \Phi_k$$

中间参数

$$Sh_{\tau} = \omega L_{\tau} / w_{\tau}, w_{\tau} = \sqrt{2 \Delta p_{\phi} a / \bar{R}_{bx}^2}$$
$$K_{\Sigma II}^* = K_{\Sigma II} \cdot \frac{\sqrt{(\bar{R}_k^2 - a)^3}}{\mu \sqrt{2a + \sqrt{(\bar{R}_k^2 - a)^3}}} = \frac{\bar{R}_k^2 - a}{A \sqrt{2} (\mu \sqrt{2a + \sqrt{(\bar{R}_k^2 - a)^3}})}$$
$$f(\bar{x}) = \frac{\omega R_{bx}}{w_{\Sigma}} \cdot \frac{\bar{R}_k^2 - a}{\mu} \cdot \frac{\bar{R}_k(1 - \bar{r})}{\bar{R}_k - \sqrt{a}} \tan \left(\frac{\pi \bar{R}_k(1 - \bar{r})}{2(\bar{R}_k - \sqrt{a})} \right)$$
$$\Phi_{k,3} = \omega L_k / v_{k,3}$$

由上述理论模型可见, 喷嘴旋流系数 $\bar{R}_{bx}$ 、无量纲参数 $a(a = A^2 \mu^2)$ 和喷嘴各个部分的传递函数都会直接影响传递函数 Π_{ϕ} 值, 而它们均与喷嘴的结构参数和工况参数有关, 尤其是敞口型离心喷嘴的几何特性 A 值和旋流腔的长径比。

2 算例及结果分析

图 1 为俄罗斯液体火箭发动机 RD120 预燃室喷嘴的结构简图, 内喷嘴为煤油敞口型离心喷嘴, 外喷嘴为液氧敞口型离心喷嘴。

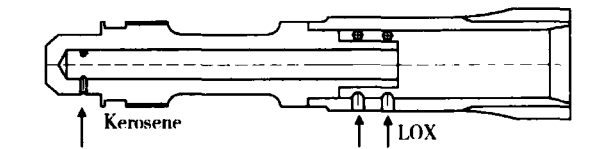


图 1 液氧煤油同轴离心喷嘴结构示意图
Fig.1 Schematic of LOX/ Kerosene coaxial swirl injector

算例喷嘴以 RD120 煤油喷嘴($A = 6.67, L_k / d = 10.71$)的大致尺寸为参考, 设计不同结构参数的敞口离心式喷嘴。介质为煤油, 密度 $\rho = 819 \text{ kg/m}^3$, 振荡衰减率 $\varepsilon = 0.6$ ^[4]。

(1) 不同长径比旋流腔的影响

表 1 为计算不同旋流腔长径比影响的模型喷嘴结构参数。

表 1 算例敞口型离心喷嘴结构参数
Table 1 Open end swirl injector parameter

喷嘴结构参数				
几何特性系数 A	4			
切向进口直径/mm	1.4			
切向进口数目/个	3			
切向进口长度/mm	5			
旋流腔直径/mm	5.6			
旋流腔长度/mm	7	28	49	75
旋流腔长径比	1.25	5	8.75	13.39

图 2 为 $A = 4$ 的情况下四种不同长径比的旋流腔的敞口型喷嘴的动态特性曲线图。由图 2 可见,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。但在长径比较小时,如图 2(a) 中在 L_k/d 等于 1.25 的情况下,曲线在低频时会有稍许起

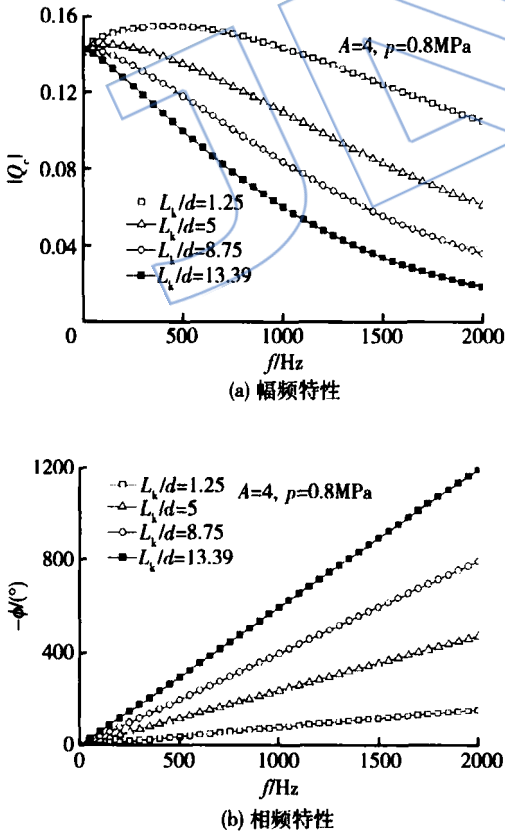


图 2 喷嘴出口流量振幅与相位随频率变化曲线
Fig. 2 Dynamics of open end swirl injector via frequency

伏。这是因为当旋流腔长度和扰动波波长相差不多(甚至小于扰动波波长)时在旋流腔内只能容下表面波的一小部分,因此扰动波占据了整个旋流腔,扰动来不及衰减,流量相对振幅会增大。在高频时由 $\lambda = v/f$ 可知,振荡波波长减小,这种效果就不会很明显了。

图 3 为不同长径比下敞口型离心喷嘴的幅相图。由图可清楚看出,在 A 值一定的情况下,旋流腔长径比越大,流量相对振幅越小,而滞后相位角 $\Phi_{k,3}$ 越大。这是因为旋流腔长度 L_k 越大,由 $\Phi_{k,3} = \omega L_k / v_{k,3}$ 可知,滞后相移越大,同时由于液体粘性摩擦导致扰动波的衰减 $1 - e^{-\varepsilon \Phi_k / 2\pi}$ 越大,致使流量振幅越小。

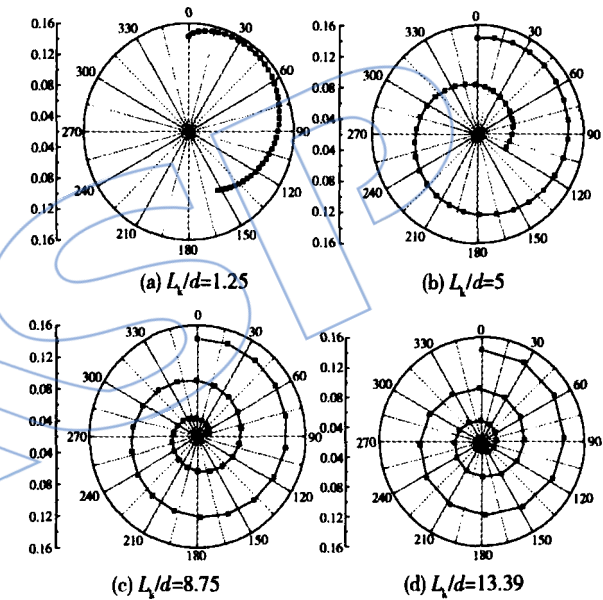


图 3 不同长径比的幅相曲线图
Fig. 3 Amplitude phase diagram of injector with L_k/d

(2) 不同 A 值的影响

为了在计算 A 值对喷嘴动态特性的影响时保持旋流腔长径比不变,设计四种不同旋流腔长度与四个 A 值对应,结构参数如表 2:

表 2 算例敞口型离心喷嘴结构参数
Table 2 Open end swirl injector parameter

喷嘴结构参数				
几何特性系数	4	6.67	8	10
旋流腔直径/mm	5.6	7	7.6	8.4
旋流腔长度/mm	50	63	68	75
旋流腔长径比	8.93			

图 4 和图 5 分别为旋流腔长径比不变,不同 A 值的敞口型喷嘴的幅、相频曲线和幅相图。

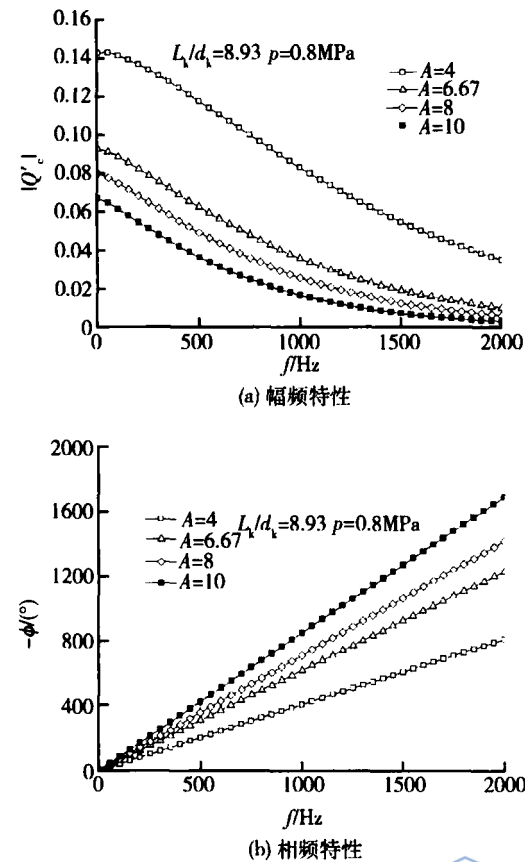


图 4 几何参数 A 对喷嘴动态特性的影响

Fig.4 Effects of geometrical characteristic

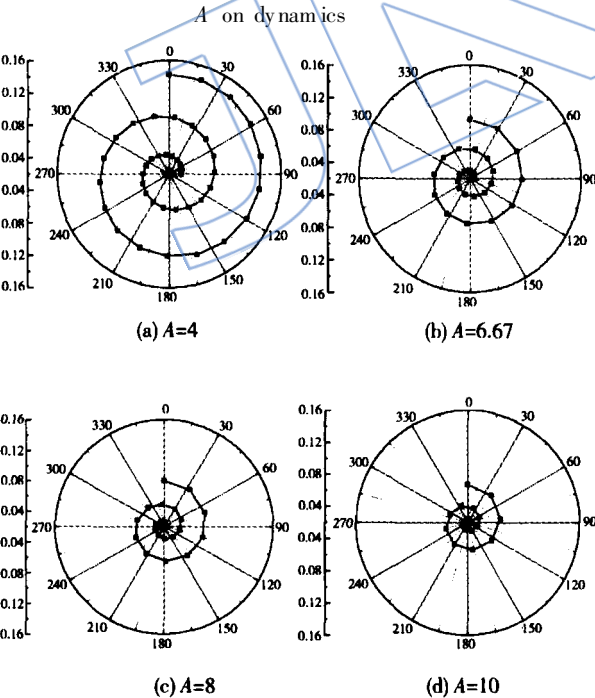


图 5 不同 A 值喷嘴的幅相曲线图

Fig. 5 Amplitude phase diagram with different A

由图可见, A 值越大, 流量相对振幅越小, 而滞后相位角越大. 这是因为 A 值表征了离心喷嘴液体旋涡旋转剧烈程度, A 变大, 旋流腔内液体旋

涡表面的振幅会降低, 由扰动从切向通道到旋流腔的传递系数可知, A 值越大, $K_{\Sigma II}^*$ 越小, 从而导致喷嘴流量振幅越小. 而由敞口型离心喷嘴旋流腔内扰动传播速度可知, $\bar{R}_k = 1$, 且 A 值越大, 无量纲参数 a 越大, 所以 v_{k3} 越小, 而同时要保持旋流腔长径比不变, 则 L_k 也会变大. 由 $\Phi_{k3} = \omega L_k / v_{k3}$ 可看出, Φ_{k3} 越大, 从而导致整个喷嘴滞后相位角越大.

(3) 不同压降的影响

图 6 为三种不同压降对敞口型离心喷嘴动态特性的影响对比图. 分析可知对同一敞口型离心喷嘴, 压降越大, 流量相对振幅越大, 而相移越小, 变化趋势与收口型离心喷嘴相同.

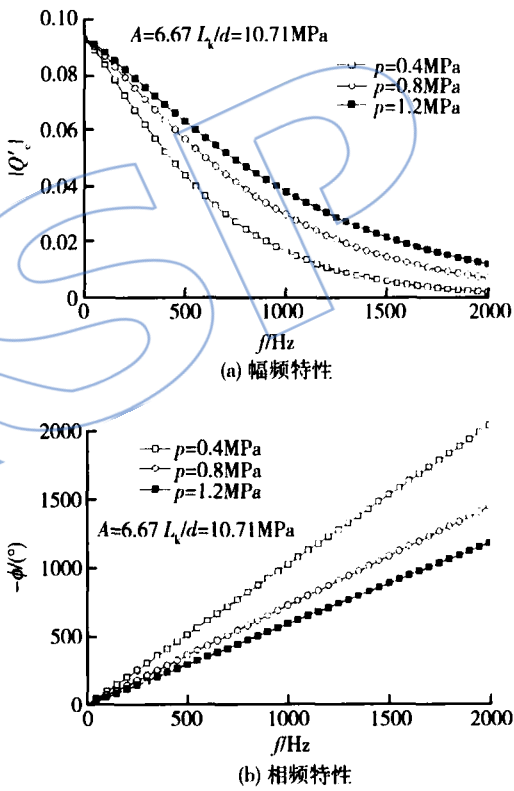


图 6 压降对喷嘴动态特性的影响

Fig. 6 Effects of pressure drop on dynamics of injector

3 敞口型离心喷嘴作为振荡相位调节器的初步分析

图 7 为高、中、低三种频率下, 敞口型喷嘴动态相频特性与旋流腔长径比的变化曲线图. 由相频曲线可见, 滞后相移随旋流腔长度的增大而增大, 而且在三种频率下, 均接近于线性增大. 现在以其中振荡频率为 1000Hz, $A = 6.67$ 的喷嘴为例来分析说明敞口型喷嘴对相位滞后有良好的可调节性.

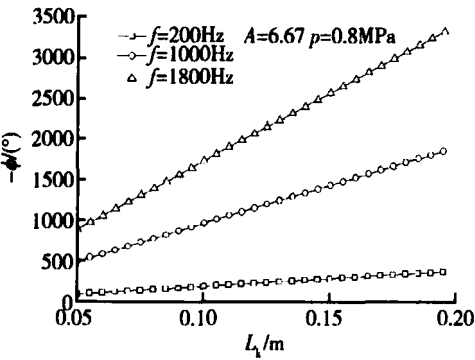


图 7 滞后相位随旋流腔长度的变化关系
Fig. 7 Phase diagram of open end injector via length of vortex chamber

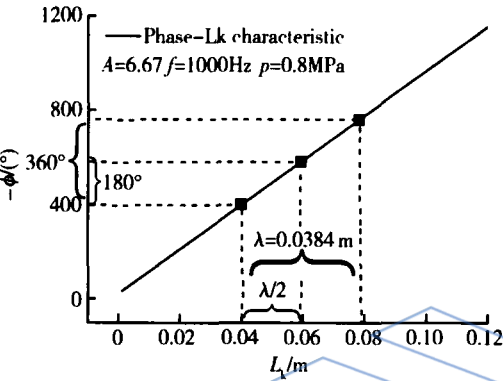


图 8 滞后相位随旋流腔长度的变化关系
Fig. 8 Phase characteristic of injector via length of vortex chamber

通过计算得出旋流腔内扰动波的波速 $v_k = 38.4 \text{ m/s}$, 当 $f = 1000 \text{ Hz}$, 扰动波波长为 0.0384 m , 如图 8 所示, 在横坐标上任取 0.0384 的间隔, 对应地在纵坐标上都会得到约为 360° 的相移差。也就是说旋流腔长度增加一个波长的长度, 引起的相位滞后相应增加。这个结论对于所有波长的扰动都是适用的。这是因为在敞口型离心喷嘴里, 没有反射波, 所以旋流腔部分的相移是线性的。而切向通道部分与旋流腔的相互作用并没有对整个喷嘴的相移产生非线性的作用, 即整个喷嘴的相移等于旋流腔部分的线性变化的相移加上切向通道

部分的定值相移, 也就是说整个喷嘴的相移随旋流腔长径比是线性变化的。因此, 可以通过调节敞口型离心喷嘴旋流腔的长度来改变振荡的相移。以 $A = 6.67$ 、旋流腔直径为 7 mm 的敞口型离心喷嘴为例, 假设从燃烧室传入 1000 Hz 的振荡并进一步传播到了喷嘴的切向入口。可以沿旋流腔轴线方向布置两个切向入口, 使两孔轴心沿旋流腔轴向的间距为半个波长 0.0192 m , 这样两个切向进口引起的振荡之间的相位角相差 180° , 振荡相互抵消, 从而起到阻尼振荡的作用。

4 结 论

- (1) 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。 A 值越大, 流量相对振幅越小, 而滞后相位角越大。 A 值一定的情况下, 旋流腔长径比越大, 流量相对振幅越小, 而滞后相位角越大。结果表明具有较大几何特性 A 值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。
- (2) 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, 应用此特性, 可以调节两个切向入口的轴向间距为该振荡波的半个波长, 来滤除该频率的振荡, 使喷嘴达到振荡阻尼器的作用。

参考文献:

[1] 巴扎罗夫 V G 著. 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.

[2] 安德列耶夫 A B, 等. 气液喷嘴动力学[M]. 任汉芬, 庄逢辰, 译. 北京: 宇航出版社, 1995.

[3] Bazarov V G, Vigor Yang. Liquid propellant rocket engine inject dynamics[J]. Journal of propulsion power, 1998, 14 (5): 797-806.

[4] 杨立军, 张向阳, 葛明和. 敞口型离心喷嘴动力学特性理论分析及研究[A]. 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论文集[C]. 厦门: 2005. 11.