

文章编号: 1000-8055(2010)09-2132-07

敞口型液体离心喷嘴动态特性数值模拟

富庆飞, 杨立军, 屈元元, 谷 彬
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 从喷嘴动力学理论分析和数值模拟两方面入手, 对敞口型离心式喷嘴动力学特性进行了研究. 通过对入口处流量施加周期性扰动的办法对喷嘴对于外部扰动的响应特性进行了分析. 结果表明: 表面波引起旋流腔内液膜厚度发生振荡, 进而引起喷嘴出口流量的脉动. 而旋转波的频率则较低. 喷嘴出口流量脉动与喷嘴压降脉动之间的相位差随着扰动频率的增大而增大, 数值模拟结果与线性的喷嘴动力学理论符合较好.

关 键 词: 液体火箭发动机; 喷嘴; 动态特性; 流量脉动; 数值模拟

中图分类号: V434

文献标识码: A

Numerical simulation of dynamic characteristics of an open end swirl injector

FU Qing-fei, YANG Li-jun, QU Yuan-yuan, GU Bin

(School of Astronautics,

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

Abstract: Theoretical studies and numerical simulation on dynamic characteristics of an open end swirl injector were performed. The response of the injector flow to external excitations was investigated by superimposing periodical oscillation of flow-rate at the inlet. The numerical simulation results show that the surface wave causes oscillation of the liquid film in the swirl chamber, and then the flow oscillation occurs at the spout. Moreover, the frequency of the vortex wave is much smaller. The phase angle between the flow oscillation at spout and the pressure drop oscillation is proportional to the oscillation frequency, which agrees well with the linear injector dynamic characteristics theory.

Key words: liquid rocket engine; injector; dynamic characteristics; flow pulsation; numerical simulation

喷嘴在液体火箭发动机中起着组织燃烧和控制推进剂流量的作用, 喷嘴上游通过集液腔与供应系统相连, 下游与燃烧室相连, 发动机整个系统中的任何微小的扰动, 都会直接或间接的影响喷嘴的流量变化, 进而影响发动机整体稳定性. 喷嘴动态特性对燃烧室燃烧过程的稳定性起到非常重要的作用.

俄罗斯学者 Bazarov^[1-3] 开创了喷嘴动力学的

的研究工作, 采用控制喷嘴内部流动的无黏流体力学方程, 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.

Zong N^[4,6] 使用大涡模技术拟对超临界情况下离心喷嘴内部流动对外部扰动的响应进行了数

收稿日期: 2009-07-27; 修订日期: 2009-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(50406007); 北京航空航天大学博士研究生创新基金

作者简介: 富庆飞(1983-), 男, 甘肃会宁人, 博士生, 主要从事液体火箭发动机喷嘴动态特性研究.

值模拟. 振荡流场模拟结果的频谱分析可以看出喷嘴动态特性包括一系列的不稳定机理: 流体动力学不稳定性、Kelvin-Helmholtz 型不稳定性、大尺度的涡结构等. 流动不稳定的发生引起质量流量以及喷雾锥角的振荡, 进一步影响流动的发展. 通过对入口处的质量流量施加周期扰动的方法对喷嘴对于外部不稳定激励的响应进行了研究. 研究发现接近流动不稳定频率的外部扰动更容易被放大.

在液体火箭发动机喷嘴中, 按离心喷嘴旋流腔和喷口直径的大小, 可以分为收口型离心喷嘴和敞口型离心喷嘴. 敞口型离心喷嘴 (open end swirl injector) 喷口的直径等于旋流腔的直径, 喷口与旋流腔成为内径一致的通腔, 而且旋转流道较长. 敞口型离心喷嘴最早应用于上世纪 60 年代俄罗斯的富氧循环发动机中, 如液氧/煤油液体火箭发动机 RD-120, RD-170 和 RD-180 的预燃室和主燃烧室中^[2]. 图 1 为 RD-120 发动机预燃室中同轴离心喷嘴, 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. 在稳态冷流工况下, 相对于普通收口型离心喷嘴, 敞口型离心喷嘴在雾化质量方面并没有明显的优势, 甚至差于收口型离心喷嘴, 但其仍能够在液体火箭发动机中得到应用, 有研究结果认为主要原因是敞口型离心喷嘴具有良好的动态性能. 杨立军等人^[7-10]在收口型离心喷嘴动力学理论的基础上, 对敞口型离心喷嘴的动态特性进行了理论分析和试验研究, 对敞口型离心喷嘴的动态特性传递函数进行了推导, 并用试验方法进行了验证.

本文对敞口型离心喷嘴动态特性进行理论分析和数值模拟, 由数值模拟结果在一定程度上验证了敞口型离心喷嘴动态特性理论. 并对外界扰动引起喷嘴流量脉动的机理进行探讨.

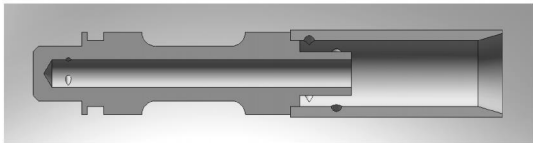


图 1 缩进式同轴离心喷嘴示意图

Fig. 1 Schematic of recessed coaxial swirl injector

1 液体离心喷嘴动态特性理论模型

液体由切向通道进入喷嘴, 在离心力作用下在旋流腔壁面上形成一层液膜. 这层薄膜沿着旋

流腔流动并遵从质量守恒和动量守恒定律. 敞口型离心喷嘴这种内部流动存在四种不稳定机理:

由于有外部扰动, 在液膜表面存在两种不同机理的扰动波: 切向通道内的流量振荡会引起旋流腔内的液膜表面波; 另一种是由于旋流腔内流速的振荡引起流场内流体以不同速度旋转, 形成旋转波. 旋转波与径向速度的分布有很大关系. 旋流腔内的压降就是表面波和旋转波引起的压降的矢量和.

当液膜离开喷口形成锥形液膜后, 由于气动力的作用, 会在液膜的外表面形成 Kelvin-Helmholtz 型扰动波. 另外, 喷嘴内压力振荡以及下游燃烧室内的压力振荡可能会与系统的声学振荡发生耦合. 所有这些不稳定扰动发展并相互作用的结果就是引起喷嘴出口的流量和喷雾角发生脉动, 这也是引起燃烧不稳定性的一个重要机理之一.

文献[8]针对敞口型离心喷嘴的动态特性进行了理论分析, 考虑了旋流腔内轴向速度对流量振荡的影响, 推导出敞口型喷嘴动态特性的计算公式. 敞口型离心喷嘴动态特性的计算可以分为两部分进行: 包括切向进口通道、旋流室. 其频率特性由各部分频率特性的矢量复合而成

$$\Pi = \left[\frac{Q'}{Q} \right] \left[\frac{\Delta p'}{\Delta p} \right] = \frac{\bar{R}_k}{a} \frac{\Pi_{k,c} \Pi_n}{2 \Pi_n (\Pi_{k,3II} + \Pi_{k,3III}) + 1} \tag{1}$$

式中 Q 为体积流量, Δp 为喷嘴压降, “ $'$ ” 表示脉动值, $\bar{R}_k$ 表示喷嘴收口系数, 对于敞口型喷嘴而言 $\bar{R}_k = 1$. a 为离心喷嘴无量纲系数, $a = 2(1 - \varphi)^2 / (2 - \varphi)$, φ 表示离心喷嘴有效截面系数, 即液体所占截面积与总截面积之比. Π_n , $\Pi_{k,c}$ 分别表示切向通道、旋流腔出口的传递函数, $\Pi_{k,3II}$, $\Pi_{k,3III}$ 表示表面波和旋转波从切向通道到旋流腔的传递函数. 这些传递函数的具体表达形式见文献[8]. 式(1)所表示的就是喷嘴动态特性, 即喷嘴对压力扰动产生反应而出现的流量振荡与喷嘴压降振荡之间的振幅和相位关系.

2 液体离心喷嘴动态特性数值模拟

2.1 数值模型和方法

建立一个二维轴对称旋转模型对敞口型离心喷嘴动态特性进行数值模拟. 使用商业软件 Fluent 6.3 来求解耦合了 VOF (volume of fluid) 方

程的两相流流场的 Navier-Stokes (N-S) 方程组^[11-12]. 计算区域如图 2 所示.

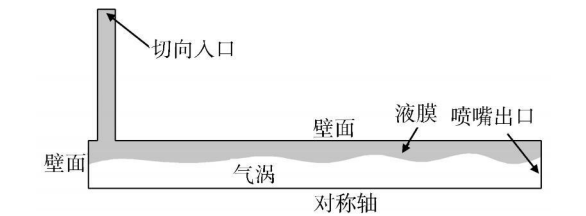


图 2 敞口型离心喷嘴动态特性计算区域
Fig. 2 Calculation domain of the open end swirl injector

网格采用结构化网格, 气液界面捕捉采用 CICSAM (compressive interface capturing scheme for arbitrary methods) 技术. 强旋流动中湍流场各向异性很明显, 求解雷诺应力分量输运方程可以得到更好的结果, 因此选用可以模拟强旋转流动的雷诺应力模型 (RSM). 二次矩闭合的 RSM 模型被用于严格模拟强湍流的各向异性特征. 压力的离散方法采用的是 PRESTO (principles of echo shifting with a train of observations) 方法, 压力速度耦合采用 SIMPLE (semi implicit method for pressure-linked equations) 方法, 动量方程采用二阶迎风格式.

2.2 喷嘴模型和边界条件

喷嘴模型的设计尺寸如表 1 所示. 其中切向入口的位置根据试验喷嘴的结构被安放在距旋流腔底部 0.8 mm 处. 入口设为速度入口. 入口切向平均速度可以根据 $V_{\theta} = Q/A_{in}$ 计算. 其中体积流量 Q 按试验喷嘴流量取 35 ml/s, A_{in} 表示切向通道入口截面积. 根据文献[3]中所述: 离心喷嘴中径向分速的最大值并不大, 根据文献[3]提出的公式估算入口径向速度. 喷嘴出口边界条件为压力出口边界, 设为大气压. 计算区域中的流体为水和空气.

表 1 敞口型离心喷嘴结构参数
Table 1 Configuration parameters of open end swirl injector

喷嘴结构参数	数值
切向通道长度 L_{in}/mm	15
切向通道直径 D_{in}/mm	1.5
旋流腔长度 L_k/mm	38.5
旋流腔直径 D_k/mm	8

3 结果讨论

3.1 喷嘴内的表面波和旋转波

图 2 为旋流腔内液膜的发展过程, 从中可以看出表面波发展引起轴向不稳定. 液膜表面波的传播情况可用浅水波传播方程来描述^[1], 即将离心喷嘴内表面波从旋流腔进入喷嘴通道的流动与表面波通过溢流堰的流动状况进行比拟, 具体表达式为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{1}{r_m} V_{in}^2 R_{in}^2 \left[\frac{r_k^2 - r_m^2}{2} \right] \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$
 (2)

式中 ξ 为液膜振幅; V_{in} 为液体由切向通道进入旋流腔时速度; R_{in} 为喷嘴内液体旋流半径; r_m 为喷嘴内空气涡的半径.

表面波的传播速度为

$$C = \frac{V_{in} R_{in}}{r_m} \sqrt{\frac{r_k^2 - r_m^2}{2}}$$
 (3)

表面波传播速度表达式右侧根号外的部分表示离心力的作用, 根号表示液膜的有效厚度. V_{in} 由入口切向速度估算, 取为 $V_{in} = 17\text{ m/s}$. 而空气涡半径由模拟结果直接量取, 取 $r_m \approx 3\text{ mm}$. 代入由式 (3) 求得, 表面波的传播速度为 2.6 m/s. 而由图 3 的模拟结果可以看出, 液膜在旋流腔轴向存

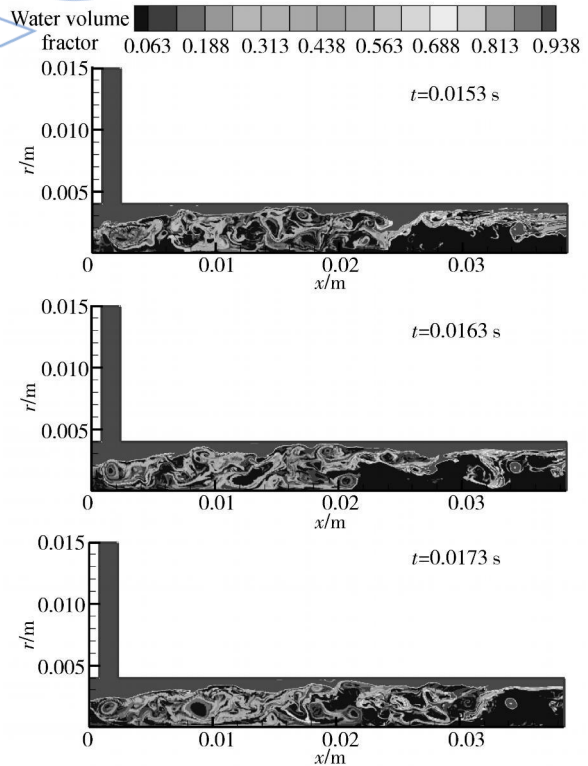


图 3 敞口型离心喷嘴内不同时刻水的体积分数
Fig. 3 Water volume fraction in the open end swirl injector for different times

在一系列的波. 从图 3 中间隔 0.001 s 的连续三幅图中得到波的位移, 与时间间隔 0.001 s 相除便可以得到表面波的平均传播速度约为 2m/s, 比由公式 (3) 预测的速度略小, 这是由于公式 (3) 忽略了液体的可压性和黏性影响.

图 4 所示为不同时刻的切向速度分布云图. 流入旋流腔的液体具有较高的切向速度, 会将之前进入旋流腔的流束挤得使其直径变小, 而且在受到随后进入的流束的挤压时其切向流速还会增大. 这实际上就形成了沿旋流腔径向传播的旋转波. 而在图 4 中看到切向速度沿径向确实存在脉动, 但旋转波的幅值较小, 并不是很明显.

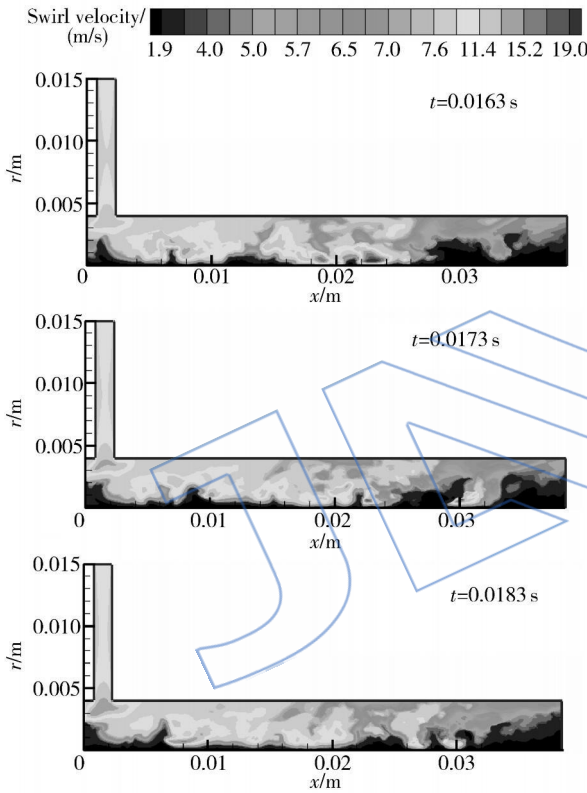


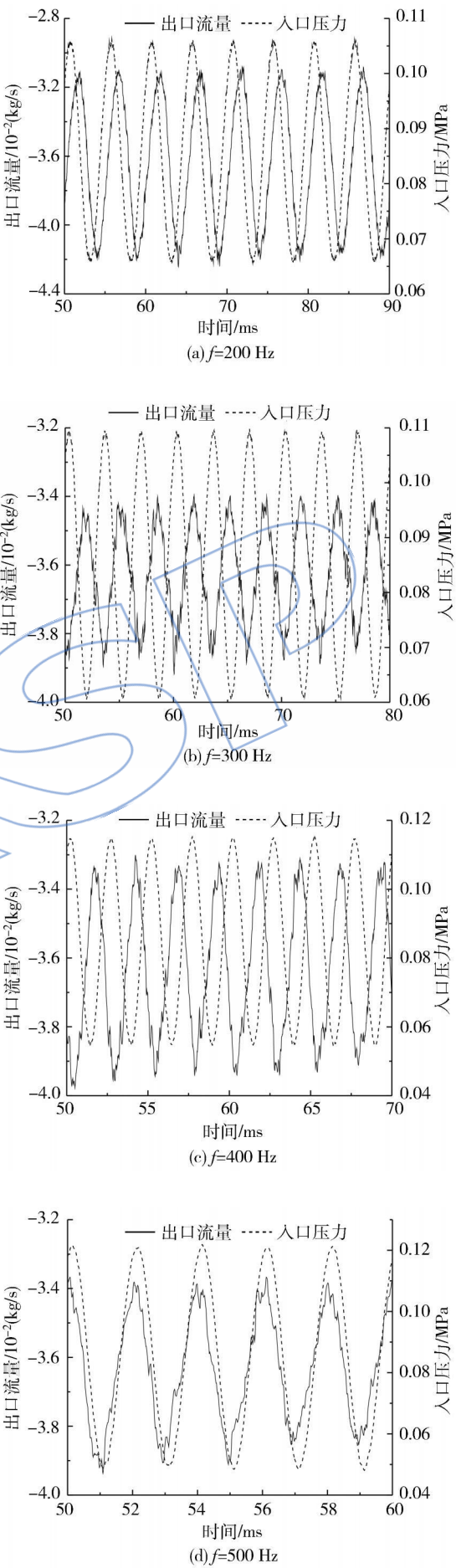
图 4 敞口型离心喷嘴内不同时刻旋转速度的云图

Fig. 4 Contour of swirl velocity in the open end swirl injector for different times

3.2 喷嘴动态特性分析

为了对敞口型离心喷嘴对于外部扰动所做的响应进行研究, 人为在切向入口处施加一个周期脉动的流量. 由于入口边界条件为速度入口, 因此将流量脉动转化为切向入口处的速度脉动: $V_{in} = V'_{in0}[1 + \alpha \sin(\omega t)]$, 其中 α 为振荡的幅度, 本文中设为 10%. 角频率 $\omega = 2\pi f$, 其中 f 表示扰动的频率.

图 5 所示为入口施加不同频率的扰动时监测



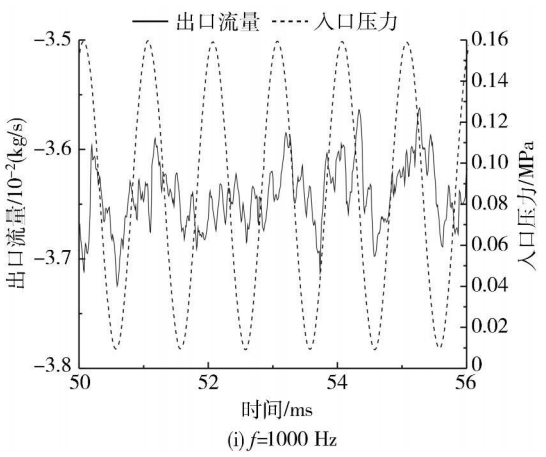
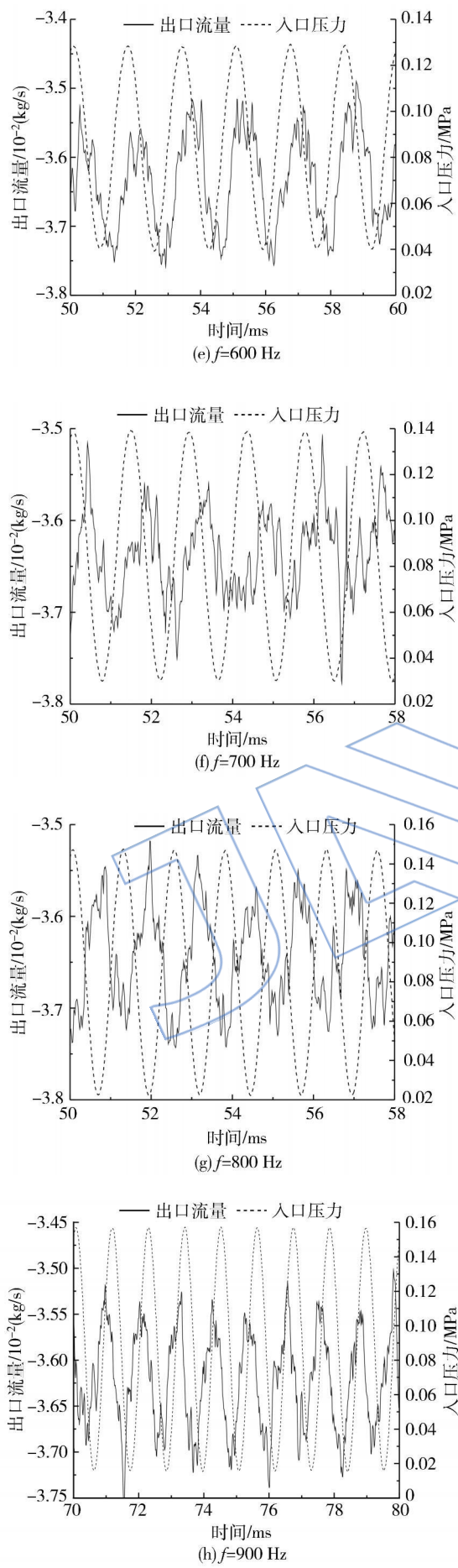


图 5 不同扰动频率下压力和流量信号脉动曲线
Fig. 5 Pressure and flow rate under different oscillation frequencies

到的入口压力和出口流量随时间变化的曲线. 根据喷嘴动力学理论, 出口流量的脉动与切向入口压力脉动之间存在着相位差. 喷嘴在此过程中起了一个相位调节器的作用. 从图 5 中可以看出, 切向入口处的压力脉动与出口处的流量脉动之间的相位差在不同脉动频率下是不同的, 这就是喷嘴的频率特性. 而且从图 5 中可以看出, 随着扰动频率的增大, 出口流量的振幅逐渐减小, 而且在高频扰动的情况下, 流量脉动变得较为杂乱. 这也是高频脉动流量的测量有较大难度的原因^[2].

不同频率下入口压力与出口流量之间的相位差可由图 6 所示的方法获得. 对若干组不同流量信号与压力信号波峰之间的相位差角取平均, 并计算其标准差, 对数值计算的误差进行估计.

将喷嘴动态特性理论计算结果(即式(1)的

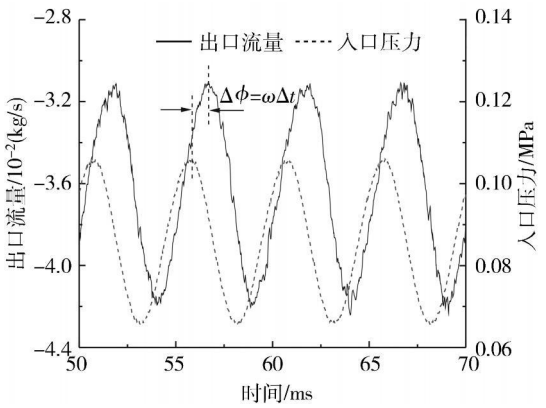


图 6 出口流量与入口压力之间相位差示意图
Fig. 6 Schematic of phase angle between flow signal and pressure signal

计算结果) 与数值模拟结果进行对比, 如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 敞口型离心喷嘴出口流量脉动与入口压力脉动之间的相位差随着扰动频率的增大近似线性增大. 这与喷嘴动力学理论^[3]较为符合. 但喷嘴动力学理论中的流体是没有黏性的, 只是在计算扰动沿喷嘴内传播时的衰减时人为加了一个黏性系数, 并规定大气环境下以水作为工质时该系数取值 0. 08. 由于该黏性系数带有经验系数的性质, 因此喷嘴动力学理论与考虑了黏性的数值计算结果有一定的误差. 本文的计算结果为修正离心喷嘴动力学理论提供了一定的依据.

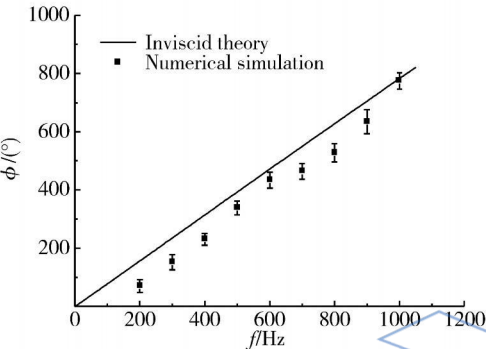


图 7 敞口型离心喷嘴动态特性曲线
Fig. 7 Phase frequency diagram of open end swirl injector

3.3 喷嘴内扰动波的频谱

为了进一步理解扰动在旋流腔内的传播过程, 在喷嘴入口处施加 1 000 Hz 的扰动, 选取敞口型离心喷嘴内部四个位置进行压力监测, 并对得到的压力脉动信号进行 FFT (fast Fourier transform) 分析. 图 8 为喷嘴内部四个不同点处的压力扰动值的频谱. 从图中可以看出, 尖峰值都出现在 1 000 Hz 处, 此频率为由表面波引起的压力脉动的频率. 此频率的扰动被放大最终引起喷嘴出口的流量脉动. 同时可以看出, 在点 2, 3 处的尖峰压力脉动幅值大于点 4, 也就是说表面扰动波在沿着旋流腔传播的过程中被湍流和黏性衰减了. 另外从图中看出, 在越靠近喷嘴出口的位置(点 3, 4), 500 Hz 左右有一尖峰的幅值越来越大. Zong N^[4] 认为此频率为旋转波的频率, 他们所研究的喷嘴旋流腔内旋转波的频率为 0. 52 kHz.

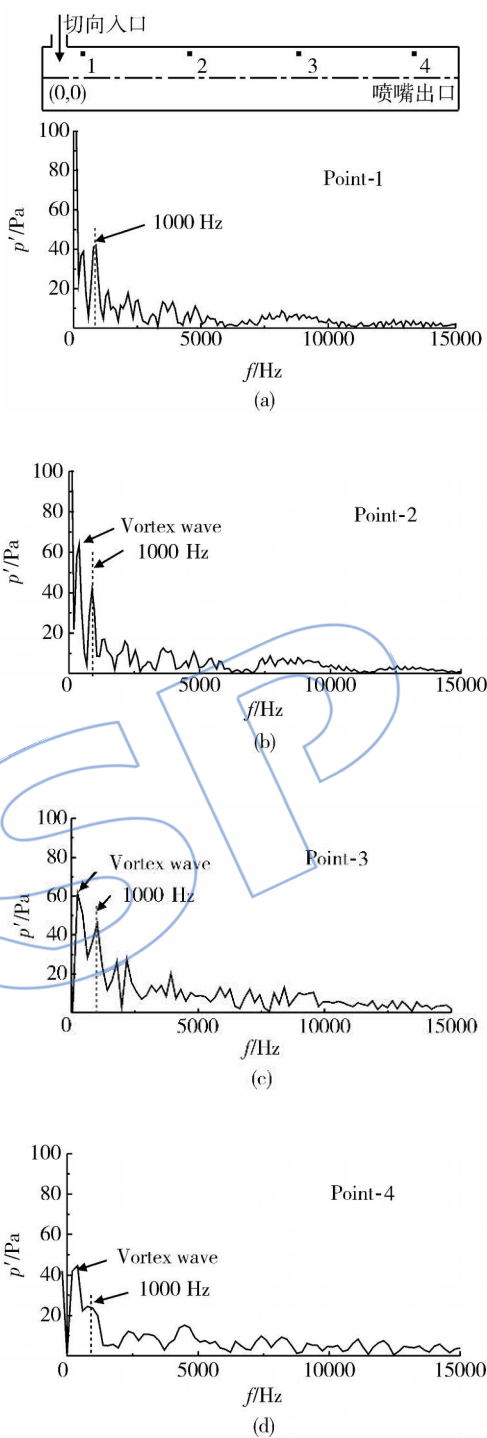


图 8 敞口型离心喷嘴内不同位置压力振荡的频谱
Fig. 8 Spectral diagram of pressure oscillation at 4 locations within the open end swirl injector

4 结 论

对敞口型离心喷嘴的动态特性进行了理论分析和数值模拟. 从喷嘴内部非稳态流场和施加外部扰动的流场的模拟结果可以看出, 喷嘴内部存

在表面波和旋转波. 表面波引起液膜厚度发生振荡, 进而引起流量的脉动. 而旋转波的频率则较低. 喷嘴出口流量脉动与喷嘴压降脉动之间的相位差随着扰动频率的增大而增大, 数值模拟结果与线性的喷嘴动力学理论符合较好, 数值模拟结果为喷嘴动力学理论的完善提供一定的指导.

参考文献:

- [1] Bazarov V G, Yang V. Liquid propellant rocket engine injectors dynamics [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 797-806.
- [2] Bazarov V G, Yang V, Puneesh P. Design and dynamics of jet and swirl injectors. [M] // Yang V, Habiballah M, Hukka J, et al. Liquid rocket thrust chambers: aspect of modeling, analysis, and design. Reston, VA: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004: 9-104.
- [3] Bazarov 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.
- [4] Zong N, Yang V. Dynamics of simplex swirl injectors for cryogenic propellants at supercritical conditions [R]. AIAA 2004-1332, 2004.
- [5] Zong N, Yang V. Supercritical fluid dynamics of pressure swirl injector with external excitations [R]. AIAA 2007-5458, 2007.
- [6] Huo H F, Zong N, Yang V. Cryogenic fluid dynamic response of swirl injector to external forcing at supercritical conditions [R]. AIAA 2009-233, 2009.
- [7] FU Qingfei, YANG Lijun, WANG Xiangdong. Theoretical and experimental study of the dynamics of a liquid swirl injector [J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(1): 94-101.
- [8] 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 [J]. 推进技术, 2006, 27(6): 497-500.
YANG Lijun, ZHANG Xiangyang, GE Minghe. Theoretical analysis of dynamics of open swirl injector [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(6): 497-500. (in Chinese)
- [9] 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.
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. (in Chinese)
- [10] 杨立军, 葛明和, 张向阳. 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, 20(6): 1083-1087.
YANG Lijun, GE Minghe, ZHANG Xiangyang. Preliminary investigation on dynamic characteristics of swirl injector [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 1083-1087. (in Chinese)
- [11] 岳明, 徐行, 杨茂林. 离心式喷嘴内气液两相流动的数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 888-890.
YUE Ming, XU Xing, YANG Maolin. Numerical study of two phase flow in atomizer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(5): 888-890. (in Chinese)
- [12] Maatje U, von Lavante E, Albina F O. Numerical simulation of unsteady effects in simplex nozzles [R]. AIAA 2002-3179, 2002.