

文章编号: 1000-8055(2010)08-1918-05

气液同轴喷嘴缩进室动态特性均相流模型

富庆飞¹, 杨立军¹, 屈元元¹, 谷 彬¹, 王 枫²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072)

摘 要: 采用频率法对气液同轴喷嘴缩进室内气液两相流动态特性进行了分析. 采用均相流模型, 在把液相介质参数看作集中参数的条件下讨论了缩进室边界压降振荡对液相质量流量振荡的动态响应. 通过对模型喷嘴算例编程进行计算, 结果表明: 随着扰动频率的增加, 缩进室两端压降振荡的振幅增大, 压降振荡与液体流量振荡之间的相位差也增大. 较小长径比的缩进室以及较小的液体喷嘴质量流量、大气液比和高反压可以抑制缩进室边界压降振荡.

关 键 词: 气液同轴喷嘴; 缩进室; 动态特性; 传递函数; 均相流

中图分类号: V434.13

文献标识码: A

Investigation on dynamic characteristic of recessed region of a gas-liquid coaxial injector with homogeneous flow model

FU Qing-fei¹, YANG Li-jun¹, QU Yuan-yuan¹, GU Bin¹, WANG Feng²

(1. School of Astronautics,

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

2. School of Astronautics,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The dynamic characteristic of gas-liquid two phase flow in the recessed region of a gas-liquid coaxial injector was investigated with the frequency method. Considering the liquid phase as a lumped element, the dynamic response of the pressure drop fluctuation in the recessed region to the liquid flow fluctuation was analyzed with the homogeneous flow model. The dynamic characteristics of the injector models were calculated. The calculation results show that, the amplitude of pressure drop fluctuation and the phase delay between the pressure drop fluctuation and liquid flow fluctuation will increase with the rising fluctuation frequency. A smaller length to diameter ratio recessed region and liquid injector mass flow, or a higher ambient pressure and larger gas to liquid ratio can depress the pressure drop fluctuation in the recessed region.

Key words: gas-liquid coaxial injector; recessed region; dynamic characteristic; transfer function; homogeneous flow

气液同轴喷嘴由于具有良好的燃烧效率和燃烧稳定性在液体火箭发动机设计中得到了广泛的

应用. 国际上几乎所有的氢氧火箭发动机均采用气液同轴喷嘴, 中心为液喷嘴, 围绕中心液喷嘴的

收稿日期: 2009-06-29; 修订日期: 2009-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(50406007)

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.

环状缝隙内喷射气体. 这种同轴式喷嘴结构几乎成了氢氧燃烧室喷嘴设计的标准方案. 尤其缩进式的同轴喷嘴更是得到了广泛的应用, 即同轴喷嘴的液体中心喷嘴相对于气体喷嘴出口缩进一定距离, 形成气液缩进混合室^[1-3], 如图 1 所示. 液体和气体在各自通道内流动, 在缩进室内发生碰撞、破碎、掺混, 由喷口流出. 由此可见缩进室内的流动状况非常复杂. 大量的研究经验表明, 缩进室是影响燃烧室入口截面推进剂相互作用的主要因素, 在缩进室内气液两相流动对燃烧完全性和稳定性均起着非常重要的作用^[4].

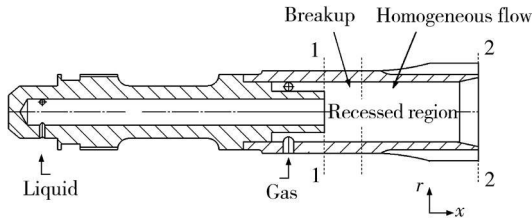


图 1 气液同轴喷嘴结构示意图

Fig. 1 Schematic of a gas liquid coaxial injector

国内外针对气液同轴喷嘴缩进混合室的研究主要集中于缩进长度对于喷嘴雾化及燃烧等性能的影响^[5-10]. 实际上缩进室在液体火箭发动机燃烧稳定性方面所起到的作用可能更为重要. 文献[2]对直流式、离心式等单组元喷嘴动态特性进行了研究, 研究结果表明喷嘴动态特性对于发动机整体动态特性有很大影响. 文献[4]对气液同轴喷嘴内气液两相流动动态特性的研究提出了基本的理论分析思路, 但并未给出详细的影响规律分析. 气液同轴喷嘴动态特性研究的难点在于缩进混合室内的流动为气液两相流, 因此本文旨在探索一种用于气液同轴喷嘴缩进室动态特性研究的模型, 并分析结构及流动参数对缩进室动态特性的影响规律, 为该型喷嘴设计提供指导.

1 缩进室动态特性气液均相流模型

在缩进室内, 由于气流速度远高于液体的速度, 液体在气动力的作用下破碎产生液滴. 当液体的初级破碎在缩进室内较短的距离完成时, 可认为液滴均匀地分散在气体中流过缩进室的其余部分, 由喷口喷出进行二次雾化. 因此可以忽略液体破碎长度, 将缩进室内的气液两相流动看成是液滴和气体均匀分布, 即均相流动模型. 此外文献[11]也提出假设缩进室内两相流流型为均相弹状流具有一定的合理性.

1.1 缩进室动态特性的集中参数模型

缩进室内液滴对气体介质的流动会产生阻力, 引起缩进室入口和出口处的压力差. 当所讨论的振荡的波长 λ 比缩进室长度 L_{rec} 大得多时, 才可以把振荡参数沿缩进室长度方向的分布情况不予考虑. 即满足 $\lambda \gg L_{rec}$ 才可把振荡参数看作集中参数处理.

当 $\lambda \gg L_{rec}$ 时, 振荡频率 $f \ll a/L_{rec}$. 对于 $L_{rec} = 20\text{mm}$ 的缩进室, 在气液两相流中的声速的范围一般为 $a \approx 20 \sim 90\text{ m/s}$ ^[12]. 因此 a/L_{rec} 在 $1000 \sim 4500\text{ Hz}$ 的范围内. 因此基于集中参数模型的缩进室动态特性模型在中低频振荡频率范围内都是合理的.

1.2 缩进室动态特性均相流模型的推导

设两相混合物的质量流量为 W , ρ 和 v 分别为两相混合物密度和流速, 则有动量方程

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \tag{1}$$

进一步假设 $v \frac{\partial v}{\partial x}$ 是比 $\frac{\partial v}{\partial t}$ 高一阶的微量, 故可略去不计. 则此时 $\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t}$, 故式(1)可写成

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

对式(2)沿缩进室轴向 x 方向进行积分, $1-1$, $2-2$ 分别表示缩进室进口和出口轴向位置处的截面, 便可得到 $1-1$ 和 $2-2$ 之间的总压损失表示为

$$p_1 - p_2 = \frac{L_{rec}}{A} \frac{dW}{dt} \tag{3}$$

其中两相混合物的质量流量 $W = \rho A v$, 气液两相混合物的密度 $\rho = \rho_g \beta + \rho_l(1 - \beta)$, A 为缩进室截面积, ρ, v 分别为两相混合物的密度和流速, ρ, ρ_g 分别为液体和气体的密度, β 为气体体积分数.

在求解动态特性时, 用频域处理方法要比用时域处理方法简单, 即在实频域求频率响应比解微分方程简便. 当某频率的正弦波状的输入加于喷嘴时, 其输出量和输入量的振幅比和相移, 称为频率特性或频率响应. 这一特性即是喷嘴动态特性在实频域的表现形式, 而通过拉普拉斯变换就可把流体力学方程转变成频率特性方程.

将方程(3)线性化并用相对扰动量表示, 而且假设缩进室内两相为集中参数, 可推出

$$\overline{\Delta p} = \frac{WL}{\Delta p A} s \overline{W} \tag{4}$$

其中 s 为拉普拉斯算子.

由 $W = \rho A v$ 可得

$$W' = Av\dot{\rho} + \rho Av' \tag{5}$$

在假设液体密度不变的条件下, $\dot{\rho} = \beta \dot{\rho}_g$, $v' = \frac{1}{A\rho} \dot{m}'$. 其中 $\dot{m}'$ 为液相质量流量的微扰量.

因此两相流流量相对扰动力表示为

$$\overline{W} = \frac{\beta \dot{\rho}_g}{\rho} + \frac{1}{Av\rho_l} \dot{m}' \tag{6}$$

又假设该流动状态绝热, 则有

$$\dot{\rho}_g = \frac{p' \rho_g}{p \gamma} \tag{7}$$

其中 γ 为两相混合物的比热比. 假设喷嘴出口压力稳定, 则 $p' = \Delta p'$.

如果两相间无传热、无摩擦, 空气将按等熵规律进行膨胀: $p \gamma_g = C$. 又在均相流中有 $\frac{\rho}{\rho_g} =$

$\frac{\gamma_g}{\gamma} = \frac{1}{1-x}$, 其中 γ_g, γ 分别为空气和混合物的密度的倒数, x 为气体质量分数. 所以 $\gamma_g = \gamma \frac{1}{1-x}$,

其中 $\frac{1}{1-x}$ 为常数, 所以 $p \gamma_g = C'$, 所以在无传热情况下, 混合物的比热比 γ 与气体比热比 γ_g 相同.

由式(4)~(7)联立得到

$$\Delta p' = \frac{WL}{\Delta p A} s \left(\frac{\beta \rho_g \Delta p}{\rho p_1} \frac{\Delta p}{\gamma} + \frac{\dot{m}_1}{Av\rho_l} \overline{m}' \right) \tag{8}$$

因此缩进室压降对液体流量振荡的响应传递函数为

$$W_m(s) = \frac{\Delta p'}{\dot{m}_1} = \frac{sWLm_1 \rho p_1}{(A \rho p_1 - sWL\beta \rho_g)Av\rho \Delta p} \tag{9}$$

由传递函数的表达式(9)可见, 喷嘴结构参数(如缩进室长度、直径等)、工况参数(如喷嘴流量、气体体积分数、工质性质等)都会直接影响传递函数 $W_m(s)$ 的值, 下面对以上参数对缩进室动态特性的影响规律进行研究, 以获得对缩进式的气液同轴离心喷嘴动力学特性规律的认识, 对于从喷嘴设计角度来消除不稳定燃烧得到一些指导原则.

2 算例及结果分析

算例喷嘴的结构简图如图 1 所示, 内喷嘴为液体敞口型离心喷嘴, 外喷嘴为气体喷嘴. 设计不同结构参数的气液同轴喷嘴缩进室. 介质采用空气和水. 根据以上理论分析结果编制程序对气液同轴喷嘴缩进室的动态特性进行了数值模拟.

2.1 不同气体体积分数 β 的影响

图 2 为模型喷嘴缩进室长度为 10 mm, 横截面半径为 3.2 mm, 喷嘴质量流量为 0.025 kg/s 的情况下, 五种不同的气体体积分数对气液同轴喷嘴缩进室动态特性的影响. 由图 2 可见, 液体流量发生脉动时缩进室压降脉动的相对振幅随着频率的增加而增大, 但是在较高频率时振幅增长缓慢, 趋近于某一定值. 同时压降脉动与流量脉动之间的相位差也随着振荡频率的增大而增大, 在较高频率时压降脉动与流量脉动的相位相差接近 180°, 即压降脉动与流量脉动接近反相.

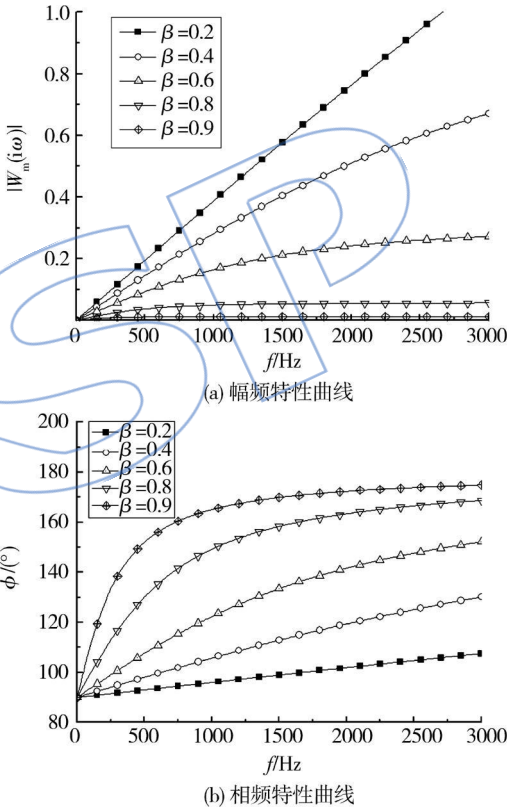


图 2 气体体积分数 β 对缩进室动态特性的影响
Fig. 2 Dynamic characteristic of recessed region with different β

同时从图 2 中可以看出随着气液比的增加, 缩进室上压降相对振幅减小, 相位差增大. 这是由于气液比增加意味着两相混合物的可压缩性增大, 则两相混合物对扰动传播的“容抗”增强, 因此压降相对振幅减小. 文献[1]得到了气-液火箭发动机中表征流量与压力扰动耦合的响应系数, 响应系数随密度减小而减小. 气液比增大意味着缩进室内混合物密度的减小, 因此响应系数减小, 这与本文的结论相吻合. 压降扰动与流量扰动之间的相位差是由于不同气体体积分数的缩进室

混合物中扰动波的传播速度的差异造成的. 均相流中气液比越大, 两相混合物的可压缩性增加, 扰动传播速度减小, 因此压降扰动与流量扰动之间的相位滞后变大.

2.2 不同液体喷嘴质量流量的影响

设计模型喷嘴缩进室长度为 10 mm, 横截面半径为 3.2 mm, 气体体积分数为 0.8, 分别计算液体喷嘴稳态质量流量为 0.025, 0.03, 0.04, 0.05 kg/s 时缩进室的动态特性.

图 3 为不同液体喷嘴质量流量下的气液同轴喷嘴缩进室动态特性曲线. 由图 3 可见, 随着液体喷嘴质量流量的增加, 缩进室压降振荡的振幅增大, 压降振荡与液体流量振荡之间的相位差也随着增大. 这可以理解为质量流量的增大引起的加速压降增大. 同时, 液体质量流量的增加意味着缩进段内气液速度比变小, 因此各相之间能充分进行动量交换, 扰动波的传播速度相对较小, 因此压降振荡与液体流量振荡之间的相位滞后增大. 同时可以看出, 四条曲线在较高频率下差别并不是很大, 因此液体喷嘴质量流量对高频扰动下的缩进室动态特性的影响较小.

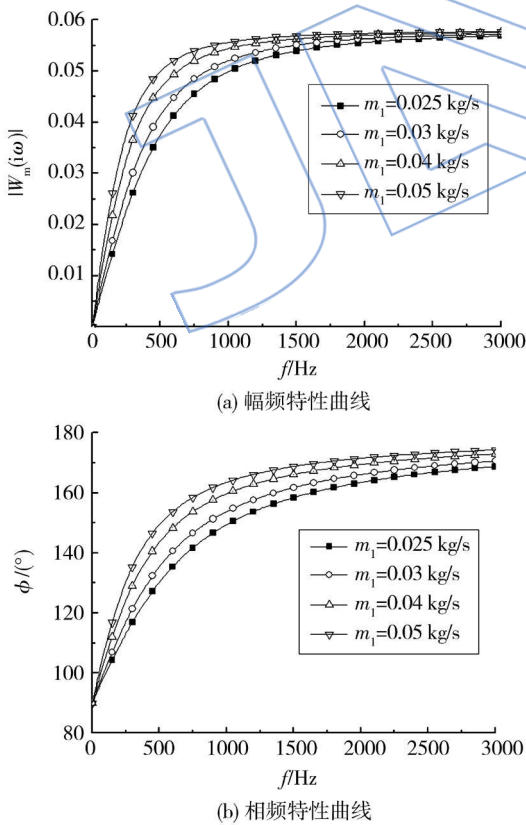


图 3 液体喷嘴质量流量对缩进室动态特性的影响
Fig. 3 Dynamic characteristic of recessed region with different liquid mass flows

2.3 不同缩进室长径比的影响

图 4 为喷嘴质量流量为 0.025 kg/s, 气体体积分数为 0.8 的情况下四种不同长径比的缩进室的动态特性曲线. 由图 4 可见随着缩进室长径比的增加, 缩进室压降振荡的振幅增大. 压降振荡与液体流量振荡之间的相位差也随着缩进室长径比的增加而增加. 这是因为将集中参数沿缩进室长度进行积分时, 长度越长, 压降振荡振幅和相位差也越大. 同时, 因为缩进室半径的减小意味着缩进室边界上的压降增大, 因此压降振荡的振幅也变大. 由于缩进室压降振荡是缩进室进、出口压力振荡的差

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_1 - \vec{p}_2 \tag{10}$$

假设入口压力振荡是恒定的, 所以当缩进室长径比增加时, 压降振荡相对振幅增大, 因此出口压力振荡相对振幅减小.

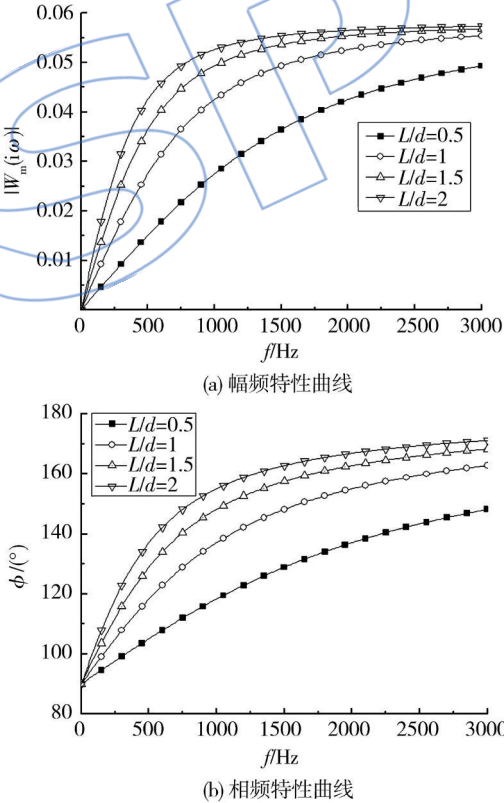


图 4 缩进室长径比对缩进室动态特性的影响
Fig. 4 Dynamic characteristic of recessed chamber with different L/d

2.4 不同反压的影响

设计模型喷嘴缩进室长度为 10 mm, 横截面半径为 3.2 mm, 气体体积分数为 0.8, 喷嘴质量流量为 0.025 kg/s, 分别计算反压为 0.5, 1, 1.5, 2 MPa 时缩进室的动态特性.

图 5 所示为不同的反压对气液同轴喷嘴缩进室动态特性的影响. 为讨论方便, 对反压 p_c 进行无量纲化 $\bar{p}_c = p_c/p_1$, 其中 p_1 为液体喷嘴压降, 取为 0.2 MPa. 由图 5 可见, 随着振荡频率的增加, 不同反压下喷嘴缩进室内压降振荡的振幅都随之增加. 但当扰动频率大于 1 000 Hz 时, 压降振荡的振幅随频率变化较小, 尤其是在较高反压下. 随着反压的增加, 缩进室压降振荡的振幅减小. 这与反压对喷嘴出口流量振荡的影响规律是一致的, 反压对离心喷嘴出口流量振荡有抑制作用. 文献[9]也指出, 燃烧室压力越高, 缩进室压力损失越小. 而反压变化对压降振荡与液体流量振荡之间的相位差无影响.

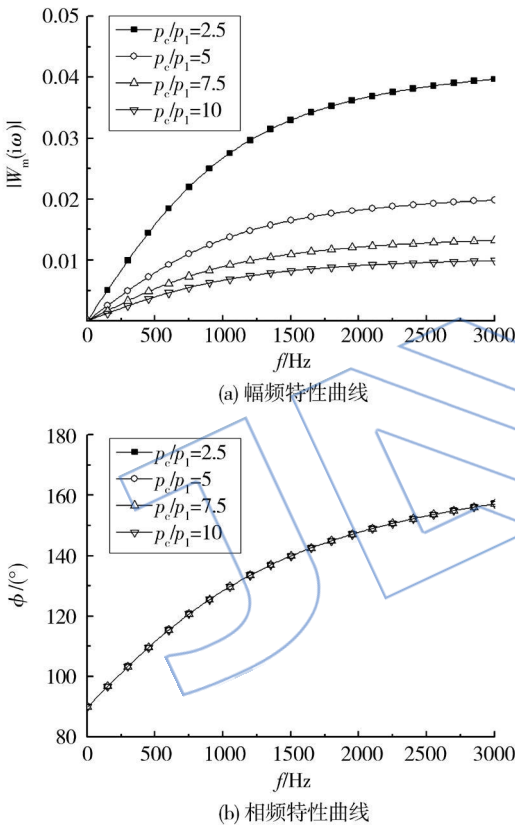


图 5 反压对缩进室动态特性的影响

Fig. 5 Dynamic characteristic of recessed region with different ambient pressures

3 结 论

- 1) 在对气液同轴喷嘴缩进室动态特性进行研究时, 当来流扰动频率处于中低频范围时 ($< 10^4$ Hz), 可以不必考虑液滴在缩进室内的分布特性.
- 2) 随着扰动频率的增加, 缩进室两端压降振荡的振幅增大, 但随着扰动频率的增加趋近于某一幅值而不再增大. 压降振荡与液体流量振荡之

间的相位差也增大, 随着频率的增大两者趋近于反相(180°).

- 3) 缩进室长径比越小, 缩进室边界上压降相对振荡越小. 较小的液体喷嘴质量流量、较大的气液比、较高的反压可以抑制缩进室边界压降振荡.
- 4) 本文对缩进式气液同轴喷嘴动态特性的研究具有重要意义, 在确定了缩进室动态特性的基础上, 可以进一步对气液同轴喷嘴整体动态特性及传递函数进行研究.

参考文献:

[1] 哈杰 D T, 里尔登 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.

[2] Bazarov V G, Yang V. Liquid propellant rocket engine injectors dynamics [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 797-806.

[3] 朱森元. 氢氧火箭发动机及其低温技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[4] 安德列耶夫 A B. 气液喷嘴动力学[M]. 任汉芬, 庄逢辰, 译. 北京: 宇航出版社, 1996.

[5] Nunome Y, Tamura H, Onodera T, et al. Effect of liquid disintegration on flow instability in a recessed region of a shear coaxial injector[R]. AIAA 2009-5389, 2009.

[6] Inamura T, Miyata K, Tamura H, et al. Spray characteristics of swirl coaxial injector and its modeling[R]. AIAA 2001-3570, 2001.

[7] Soller S, Wagner R, Kau H, et al. Combustion stability characteristics of coax swirl injectors for oxygen/kerosene [R]. AIAA 2007-5563, 2007.

[8] 孙纪国, 庄逢辰, 王珏. 缩进深度对同轴式喷嘴流量特性的影响[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 452-455.

SUN Jiguo, ZHUANG Fengchen, WANG Jue. Effects of recess on coaxial injector's discharge coefficient and performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(5): 452-455. (in Chinese)

[9] 洪流, Fusetti A, Rosa M D, 等. 液氧/甲烷火焰和燃烧不稳定性试验[J]. 推进技术, 2007, 28(2): 127-131.

HONG Liu, Fusetti A, Rosa M D, et al. Experimental investigation on combustion instability of liquid oxygen and methane flame [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(2): 127-131. (in Chinese)

[10] 张蒙正, 李鳌, 李进贤, 等. 气/液同轴离心式喷嘴流量及雾化特性实验[J]. 推进技术, 2004, 25(1): 19-22.

ZHANG Mengzheng, LI Ao, LI Jinxian, et al. Experimental study on flow rate and spray characteristic of coaxial centrifugal injector [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(1): 19-22. (in Chinese)

[11] Feiler C E, Heidmann M F. Dynamic response of gaseous hydrogen flow system and its application to high frequency combustion instability[R]. NASA TN D-4040, 1967.

[12] 张远君, 王慧玉, 张振鹏. 两相流体力学[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.