

过氧化氢/酒精燃气发生器系统稳定性仿真^{*}

谭建国, 刘景华, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为解决某过氧化氢/酒精燃气发生器中出现的低频不稳定现象, 开展了耦合二维燃烧室模型和一维供应系统模型的仿真研究, 得到了燃气发生器内的低频振荡现象, 振荡频率与试验值较一致, 分析了各种因素对稳定度的影响。结果表明: 混合维仿真方法有利于提高系统仿真的可靠度, 过小的喷注压降、较低的燃烧温度, 是造成系统不稳定的主要因素。

关键词: 燃气发生器; 系统稳定性; 仿真; 过氧化氢

中图分类号: V434.22 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2010) 01-0078-04

Simulation on system stability of hydrogen peroxide/ethanol gas generator

TAN Jian-guo, LIU Jing-hua, WANG Zhen-guo

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In order to solve the problem of low-frequency instability occurred in hydrogen peroxide/ethanol gas generator simulation is conducted which integrates 2-dimensional combustor model and 1-dimensional feed system models. The fluctuations are observed in accordance with experiment results through simulation and the effects of various factors on stability degree are analyzed. Results show that the method which mixes different dimensional models is helpful to improve the fidelity of system simulation. Both too low injecting pressure and relative low combustion temperature contribute to the system instability.

Key words Gas generator; System stability; Simulation; Hydrogen peroxide

1 引 言

在某过氧化氢/酒精燃气发生器的研制过程中, 多次出现强烈的振荡现象。尽管液体火箭发动机中的不稳定性是一个长期存在的困难, 但过氧化氢/酒精燃气发生器中的稳定性似乎出现得更频繁、危害性更大。Johnson^[1]在 H_2O_2 /JP-8 的发动机中, 发现了催化床诱发的系统不稳定性; 国内西北工业大学在开展过氧化氢的固液混合火箭发动机中, 也出现了低频振荡的现象^[2]。

图 1 是试验时的压力曲线, 从两方面可以判断这是一个系统不稳定: (1) 振荡频率低; (2) 室压 (p_c)、过氧化氢喷前压力 (p_{inj})、酒精喷前压力 (p_{inj}) 具有很好的同步性。

系统仿真是解决发动机动力学问题的途径之

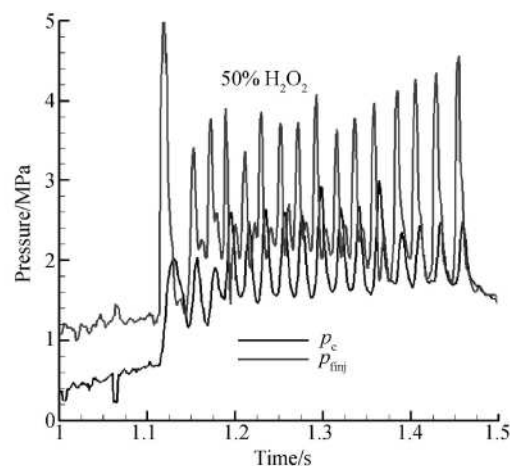


Fig. 1 Experimental pressure curves

一^[3]。在传统的发动机仿真模型中, 采用分布参数的供应系统模型能够较好地模拟管路、阀门等的非稳态过程, 但基于时滞理论的燃烧室模型则难以反应真

* 收稿日期: 2008-12-17; 修订日期: 2009-05-19。

作者简介: 谭建国 (1974—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为发动机试验和系统仿真。

E-mail: tanjgnai@yahoo.com.cn

实燃烧过程,是系统仿真偏差较大的主要原因。

本文考虑了燃烧室内的流动和化学反应过程,建立了二维燃烧室模型,并将该模型与一维供应系统模型耦合起来,克服了传统时滞模型的局限。据此开展了过氧化氢/酒精燃气发生器的仿真研究,得到了燃气发生器内的振荡现象,分析了影响稳定性的因素。

2 系统仿真模型

图 2 是与某过氧化氢/酒精燃气发生器试验系统相对应的仿真系统。包括:氮气源(N_2 source)、减压阀(Relief valve)、过氧化氢和酒精的储箱(Tank)、推进剂主阀(Main valve)、文氏管(Venturi)、催化床(Catalyst bed)、喷注器(Injector)和燃烧室(Combustor)。

其中,管路系统采用了一维分布参数模型、燃烧室采用了二维轴对称模型、其它部件则采用了零维模型。二维燃烧室模型包括质量守恒、动量的 N-S 方程、能量守恒方程、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、喷雾液滴的 DPM 粒子轨道模型、基于阿累尼乌斯公式的有限反应速率/焓耗散模型。有关这些模型及其求解方法,可参阅文献[4-5]。

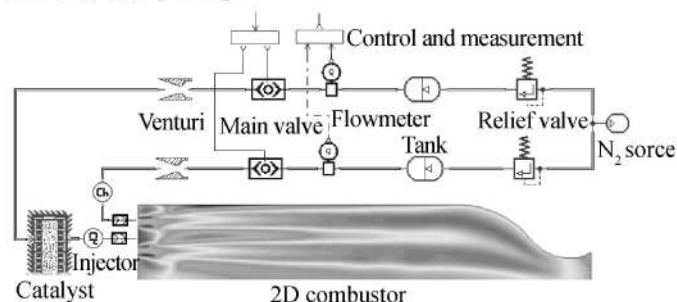


Fig. 2 Schematic of simulation system

本仿真的局限在于催化床模型。催化床中由于存在复杂的气、固、液三相流动,且催化床中过氧化氢由液态变为气态是一个复杂的表面反应,因此本文液体推进剂进入催化床后就直接变为了气体。

假设在 0^- s 时,系统处于稳定状态,而在 0^+ s 时,给系统一个扰动,考察其后系统的稳定性。本文采用了两种形式的扰动:

- (1) 过氧化氢流量突然上升 20%;
- (2) 酒精流量突然上升 20%。

3 无耦合时的燃烧室响应

假设燃烧室与供应系统无耦合,燃烧室内的压力波动不会影响供应系统,从而进入燃烧室的流量将持续为大流量。

图 3 是过氧化氢流量突然上升 20% 后的室压曲线,稳态室压为 3.18 MPa。可以看到,室压在起始阶段急剧上升,随后再缓慢上升,直到较平稳状态,此时的稳态室压约为 3.64 MPa,压力上升为 14.5%。

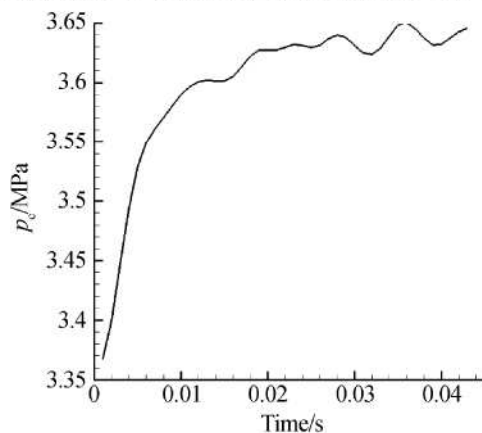


Fig. 3 Response of chamber pressure to step variation of hydrogen peroxide flow rate

根据以燃烧时滞为基础的燃烧室模型,可以根据这种阶跃响应估计其时滞值 τ 约为 10~15 ms。这比一般火箭发动机的时滞大,这是因为在燃气发生器中,燃烧温度较低,蒸发和反应速率较慢的原因。

还可以看到,当不考虑供应系统时,燃烧室中并没有出现不稳定现象。因此,低频不稳定必然与供应系统相关。

对酒精流量突然上升也做了类似仿真,酒精的燃烧时滞达到了 30 ms 左右。

4 有耦合时的振荡

图 4 是当过氧化氢流量突然上升 20%,随后恢复原值,室压和酒精流量的振荡曲线。可以看到,对这个脉冲响应,室压和流量在最初出现了小幅度的振荡,但这种振荡是不稳定的,它不断增长,直到达到一个极限环位置,并在该位置保持基本等幅的振荡。室压振荡的幅值为 0.36 MPa 为稳态值的 11.3%,流量振荡的幅值为 0.62 kg/s 为稳态值的 40%,可见,振荡是相当大的。

仿真的振荡频率约为 86 Hz,试验的频率为 55 Hz,二者差别较大,这与仿真中的催化床模型过于简化有关。仿真中,过氧化氢进入催化床就直接变成了气体,试验中,过氧化氢要经过一段距离才能催化分解为液体,甚至到出口还有部分未催化。但准确的催化床模型还有待探索。

当发动机出现振动时,燃烧室内的流场发生显著变化,图 5 是一个周期内的温度变化,一个周期的时

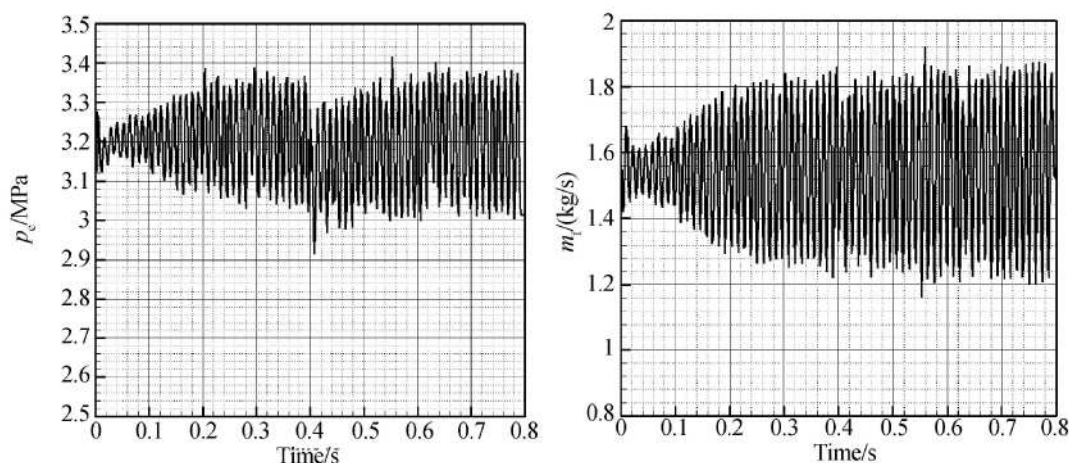


Fig. 4 Fluctuation of chamber pressure and mass flow rate of ethanol

间间隔约为 12 ms。可以看到, 在一个周期内, 高温区做前后摆动, 在 $1/6T$ 时刻, 燃烧室约 $1/3$ 长度处的整个横截面上都是高温区, 随后该高温区后移, 在 $4/6T$ 时刻, 基本达到喷管收缩段, 然后火焰再次传向前端, 并使得截面上的温度升高。

图 4 与图 3 的对比表明: 由于在燃烧室的二维仿真中引入了供应系统的一维模型, 才会体现出发动机的系统和燃烧振荡特性, 而单纯的燃烧室仿真只能得到高频振荡特性。这也与发动机振荡的传统认识相一致: 低频主要是由于燃烧室与供应系统耦合引起的。

更多的仿真实践表明: 当增大喷嘴直径, 使得喷注压降低至仅有 0.04 MPa 时, 系统将变得极度不稳定, 并出现严重非线性。此时, 流量和压力的频谱将有多个峰值, 且能量在较宽范围内分布。

5 影响稳定性的因素

以室压为参考, 定义发动机不稳定性 M_{unst} 为

$$M_{\text{unst}} = \frac{(p_{\text{max}} - p_{\text{min}}) / 2}{p_{\text{mean}}} \times 100\%$$

图 6 是不同喷注压降下的不稳定性, 可以看到, 当压降相当低时, 系统极度不稳, 事实上发动机可能已经振荡熄火, 随着压降增加, 系统稳定性显著提高, 从该图可以看到, 为了使发动机可靠工作, 应当使过氧化氢分解气体的压降高于 0.12~0.15 MPa。

确定喷注压降为 0.25 MPa, 过氧化氢浓度和余氧系数对不稳定度的影响如图 7 所示, 可以看到:

(1) 对同样的过氧化氢浓度, 余氧系数越低, 系统越难以稳定;

(2) 对同样的余氧系数, 浓度越低, 系统越不稳定, 但在余氧系数为 0.8~1 时, 该规律有所背离;

(3) 过氧化氢浓度和余氧系数的组合对应了不同温度, 当温度低于 1200 K 时, 系统易于发生不稳定性, 必须通过继续提高压降来维持系统的稳定性。

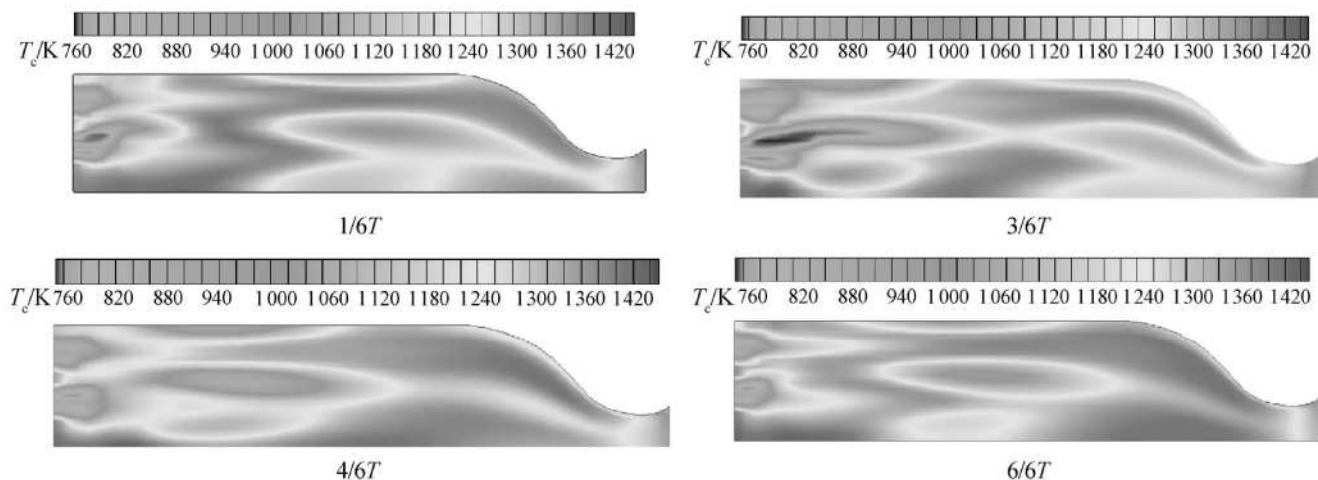


Fig. 5 Variation of temperature field within one period

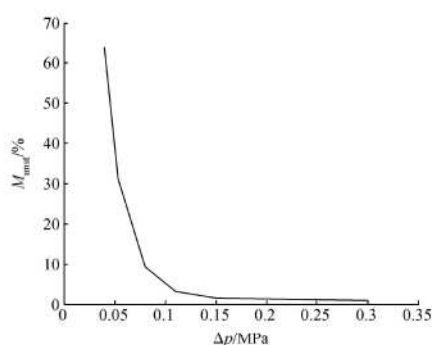


Fig. 6 Unstable degree vs injector pressure loss

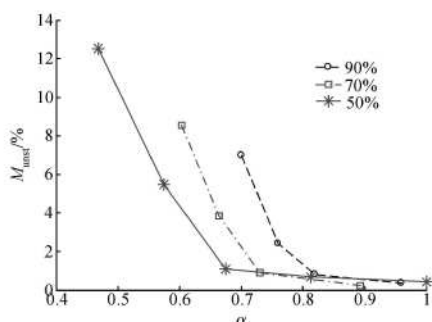


Fig. 7 Unstable degree vs concentration of hydrogen peroxide and excess oxygen coefficient α

6 结 论

本文针对某氧化氢/酒精燃气发生器中出现的低

频不稳定现象,建立了二维燃烧室模型,并将该模型与一维供应系统模型耦合起来进行仿真,结果表明:

(1)混合维仿真方法可行,所得振荡频率与试验频率较一致;

(2)低频振荡主要是由于燃烧室与供应系统耦合引起的,单纯的燃烧室仿真没有振荡;

(3)为避免出现振荡,过氧化氢的喷注压降应高于 0.12~0.15 MPa,过氧化氢浓度和余氧系数应适当组合,以保证较高的燃烧温度。

参考文献:

- [1] Johnson C, Anderson W, Ross R. Catalyst bed instability within the USFE H_2O_2 /JP-8 rocket engine[R]. AIAA 2000-3301.
- [2] 杜新,汪亮. H_2O_2 -PE 固液火箭发动机低频不稳定燃烧研究[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(1).
- [3] Karim iH, Nassirharand A. Dynamic and nonlinear simulation of liquid propellant engines[J]. *Journal of Propulsion and Power*. 2003, 19(5): 938~944.
- [4] 张育林. 液体火箭发动机动力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [5] 刘景华. 过氧化氢发动机动态特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2008.

(编辑: 梅 瑛)

(上接第 64 页)

进行优化。按照需求不同,分别研究了最大推力模式、最低油耗模式等寻优模式。并在真实的机载计算机上实时完成了推进系统性能寻优控制器的硬件在回路仿真。仿真结果表明,性能寻优控制能够在确保发动机安全工作的前提下显著提高发动机的性能,且能够在当前的实际机载计算机上投入使用。该方法具备一定的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 樊思齐,徐芸华. 航空推进系统控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [2] Tagashira T, Sugiyama N. A performance optimization control of variable cycle engines[R]. AIAA 2003-4984.

- [3] Klobe M, Riegler C, Salchow K. Real time capability for a full thermodynamic engine performance computer program[C]. *Proceedings of the 9th CEAS European Propulsion Forum*, 2003.
- [4] 吴丹. 航空推进系统非线性性能寻优控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [5] Gilyard Glenn B, Ome John S. Performance seeking control program overview and future directions[R]. *NASA Technical Memorandum* 4531, 1993.
- [6] Ome John S, Connors Timothy R. Supersonic flight test results of a performance seeking control algorithm on a NASA F-15 aircraft[R]. AIAA 94-3210.

(编辑: 张荣莉)