

# 声腔应用于液体火箭发动机不稳定燃烧抑制中的特性研究\*

聂万胜 庄逢辰

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘要** 本文针对抑制液体火箭发动机不稳定燃烧的声学装置——赫姆霍兹声腔和四分之一波长管声腔进行了研究。讨论了在声腔设计安排中正确选择声腔的数目,且比较了不同长度声腔的阻尼特性。通过考察声吸收系数的方法来最优化系统的阻尼,得到了可供设计参考的结论。

**关键词** 高频燃烧不稳定抑制装置,赫姆霍兹声腔,四分之一波长管声腔,阻尼特性,声吸收系数

**分类号** V 434 11

## The Study of Characteristics of Resonators Used in Liquid Rocket Engines Combustion Stabilities Suppression

Nie Wansheng Zhuang Fengchen

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha 410073)

**Abstract** Helmholtz resonators and quarter-wave resonators are studied as the high-frequency combustion instabilities suppression devices in liquid rocket engines. Proper selection of the number of the resonators within the absorber arrangement is discussed. The damping characteristics of various length resonators are compared. Optimizing the system's damping by means of the absorption coefficient is suggested. The valuable results are proposed for designers.

**Key words** high-frequency combustion instabilities suppression devices, Helmholtz resonators, quarter-wave resonators, damping characteristics, absorption coefficient

在许多火箭发动机的研制发展过程中都发生过高频不稳定燃烧,而解决不稳定燃烧通常很困难,需要进行大量的昂贵的全尺寸试车,一般还需要在发动机定型之前重新设计喷注器。燃烧室的一部分或全部。所以,能够在发动机研制的早期,对其不稳定燃烧发生的可能性加以预测,并考虑适当的解决办法是非常重要的,有着巨大的经济价值和经济效益。

液体火箭发动机高频不稳定燃烧的机理已经研究了几十年,但能够完全指导设计喷注器。燃烧室的通用准则仍然没有,其中一个原因就是已有的喷注器有许多种,而且采用的推进剂组合又有许多种,还包括雾化、蒸发、混合和燃烧等复杂过程。与此不同的是,不稳定燃烧的抑制装置还是有限的,所以针对它们提出一些通用的设计准则应该容易一些。声腔比之隔板不同的是,声腔不象隔板那样对燃烧室流动条件影响大,所以一般应优先考虑使用声腔来抑制发动机的不稳定燃烧。本文就是针对声腔的性能特点进行了研究,以给出发动机设计中有用的结论,从而指导设计,改善设计效果。

### 1 基本模型和理论计算关系式

这里针对一个小发动机的结构尺寸进行计算,燃烧室直径为 90mm,长为 120mm,加一短喷管长 69mm。必须先近似计算出燃烧室的声振频率,通过对燃烧室中压力的波动方程求解<sup>[3]</sup>,可以得出燃烧

\* 1997年8月27日收稿

第一作者:聂万胜,男,1969年生,博士生

室的声振荡频率:

$$f_{m,n,q} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{T_{m,n}}{R_c}\right)^2 + \left(\frac{q}{L}\right)^2} \quad (1)$$

式中  $m, n, q$  均为正整数, 分别代表径向、切向和纵向振型的谐振数;  $L, R_c$  为燃烧室的长度和半径;  $T_{m,n}$  为  $J'_n\left(cT_{m,n}\frac{r}{R_c}\right)\Big|_{r=R_c} = 0$  的第  $m$  根, 根据  $m, n$  数值不同, 可解得  $T_{m,n}$  的值,  $c$  为声速. 这样就可以算出燃烧室发生不稳定燃烧的各种振荡振型的频率, 为抑制装置的设计, 如选择声腔的结构参数和数目打下基础.

赫姆霍兹声腔和四分之一波长管已经成功地应用于燃烧振荡的抑制中, 所以对赫姆霍兹声腔和四分之一波长管这两种声腔进行比较, 找出其性能的不同和优劣很有意义, 可以帮助设计者更好地选择. 一般情况下, 声腔的尺寸相对于振荡的波长来说比较小, 声腔内部的气体运动可以按质量弹簧系统来处理. 这样经过一些声学推导就得到它们的固有频率表达式, 如图 1 所示, 赫姆霍兹声腔的固有频率为:

$$f^0 = \frac{c}{2c} \sqrt{\frac{s}{V(l + \Delta l)}} \quad (2)$$

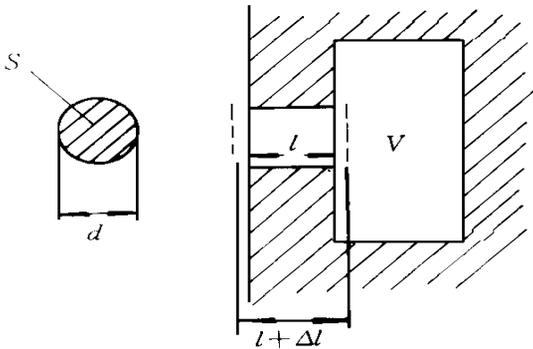


图 1 赫姆霍兹声腔示意图

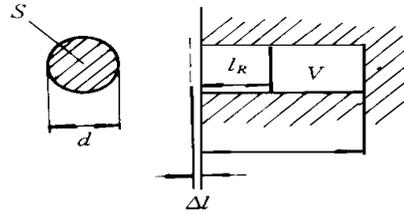


图 2 四分之一波长管声腔示意图

图中  $s$  为孔的面积,  $l$  为孔的长,  $V$  为孔的容积,  $\Delta l$  是质量修正. 对于不是很高的声压级来说,  $\Delta l$  近似等于  $0.85l$ , 一般不会引起大的误差 [4]

四分之一波长管即使稍有不同也可以按质量弹簧系统处理, 其固有频率为

$$f^0 = c / (4(L_r + \Delta l)) \quad (3)$$

研究声腔的声学性能时, 特别关心的是其吸声性能, 即声学吸收效果和其声阻抗. 而声阻抗一般是复数, 包括声阻  $R$  和声抗  $x$  两部分, 即

$$Z = R + ix \quad (4)$$

声阻抗由声腔的几何尺寸和力学性能决定, 与小孔的振荡质量和容积的变化相关, 而阻尼同小孔内的粘性耗散有关. 根据声腔参数写出其声抗公式:

$$x = 2cf d(l + \Delta l) (1 - (f^0/f)^2) \quad (5)$$

总的声阻尼包括辐射阻尼和孔壁的粘性耗散 (即内阻) 两部分:

$$R = R_r + R_i \quad (6)$$

其中辐射阻尼项写成下式

$$R_r = 2c d_s f^0 l c \quad (7)$$

内阻是孔长的函数, 定义为如下

$$R_i = 4(X_r + X_{nl} + l/d) \sqrt{\nu d c f} \quad (8)$$

$\nu$  为动力粘性,  $X_r, X_{nl}$  是阻尼因子,  $X_r$  取决于孔的表面光洁度,  $X_{nl}$  是考虑到很高声压级的非线性修

正, 一般情况下的影响不大, 预先的计算时可以不考虑。这个方程对四分之一波长管也是正确的, 只要把  $l$  用有效声质量长度  $k$  代替即可。四分之一波长管的声阻抗为

$$x = -4d(k + \Delta l)f_0 \cdot \text{ctg}(cf/2f_0) \quad (9)$$

当考虑到燃烧室的横截面积, 乘以  $A/s$  就可以求出声腔的比声阻  $r$  和比声抗  $x$ , 当有  $n$  个不同的调谐声腔安装在燃烧室周围, 其总的声阻抗由并联关系得出

$$Z = \left[ \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{Z_i} \right]^{-1} \quad (10)$$

这样声吸收系数和声导 (声腔导纳的实数部分) 就可以给出

$$T = \frac{4r}{d_c} \sqrt{\left[ \left[ 1 + \frac{r}{d_c} \right]^2 + \left[ \frac{x}{d_c} \right]^2 \right]} \quad (11)$$

$$a = \frac{r}{d_c} \sqrt{\left[ \left[ \frac{r}{d_c} \right]^2 + \left[ \frac{x}{d_c} \right]^2 \right]} \quad (12)$$

在声腔的设计中, 需要使其声吸收系数最优化, 而满足系统阻尼要求

## 2 算例结果和分析

对于四分之一波长管声腔而言, 考察两个管长不同而其它完全一样的声腔, 如图 3 短的声腔其调谐频率反而比长声腔高, 且频带也宽些, 但声吸收系数比长声腔小。对于多个四分之一波长管声腔的组合来说, 如图 4 14个短声腔的调谐频率比 14个长声腔的调谐频率高, 且频带也更宽, 但其声吸收系数却比长声腔的大。图 5说明了 12个长声腔和 2个短声腔的组合特性也不同于 12个短声腔和 2个长声腔的组合, 具有类似的性能特点。可以得出同样结论: 短声腔组合的调谐频率更高, 且吸收频带也更高, 所以更适合应用于高频不稳定燃烧的抑制中。在具体的声腔数目选择上, 如图 6 比较了三种组合的声腔特性。图中显示, 5个短声腔就可以满足要求, 达到 100% 的声吸收特性, 而使用 15个声腔就使系统过阻尼, 这增大了无谓的能量损耗; 若使用一个声腔, 则使系统欠阻尼, 而达不到抑制不稳定燃烧的要求。图 7对应的声导也说明了同样道理。

对于这里考虑的赫姆霍兹声腔, 是具有与四分之一波长管一样的长度, 但由于其有一个空腔的缘故, 使得其阻尼特性得到明显增强。如图 8 3个赫姆霍兹声腔就使声吸收系数达到 100%, 与四分之一波长管不同的是, 赫姆霍兹声腔的调谐频率低一些, 所以应用于相对频率低一些的不稳定燃烧抑制中较为有利。本文研究的小发动机, 其燃烧室内部的声振荡频率的比较高, 所以更适合采用多个四分之一波长管声腔的组合作为抑制装置, 这一点已经在实践中得到了验证。

## 3 结论

- (1) 为避免过多的无谓能量损耗, 可以根据声吸收系数的最大值来选择适当的最优化的声腔个数, 以满足设计要求即可, 并不是多多益善。这样还可以降低结构的复杂性和制造成本。
- (2) 赫姆霍兹声腔比相同长度的四分之一波长管声腔的阻尼更大, 但其相应的调谐频率比四分之一波长管低, 所以针对小发动机的声振荡频率较高的特点, 选用四分之一波长管声腔更为合理, 而且结构简单。
- (3) 短声腔比之长声腔具有更高的调谐频率, 所以尤其适合用在小发动机上, 而赫姆霍兹声腔更适合用在较大的发动机上。
- (4) 当燃烧室内部的燃气性质还不能准确确定时, 需要考虑适当地过阻尼, 对大发动机可以采用多个赫姆霍兹声腔, 而对小发动机可以采用多个四分之一波长管的组合, 这样就适当地增加了声吸收的频带宽, 以确保发动机的燃烧稳定性。
- (5) 对于未知的各向异性的声压场, 模型需要修正, 但使声吸收系数最优化的策略仍是可行的。

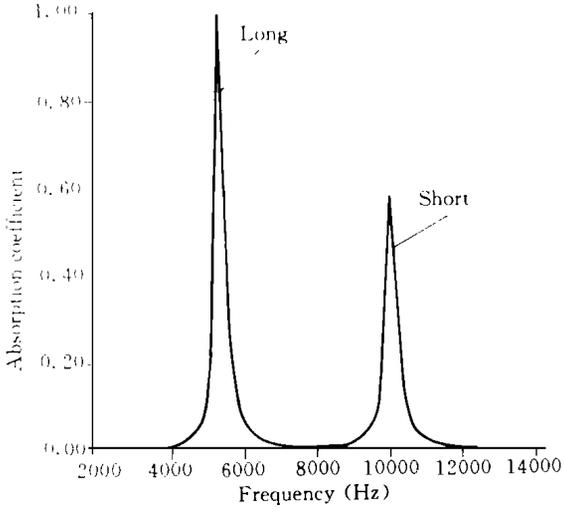


图 3 长度不同的两个四分之一波长管声腔吸收系数的比较

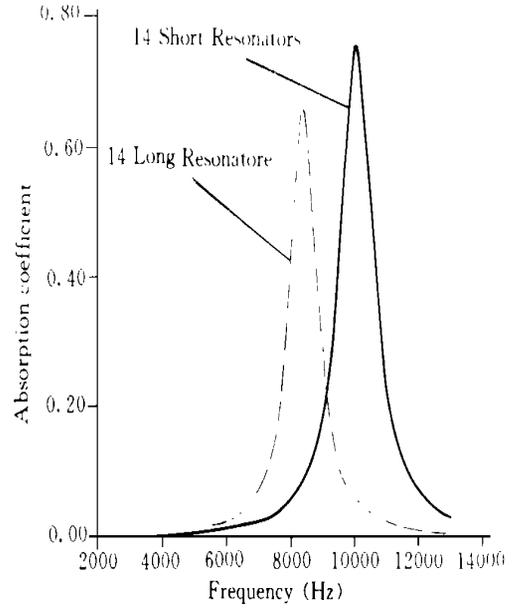


图 4 14个长声腔与 14个短声腔的吸收系数比较

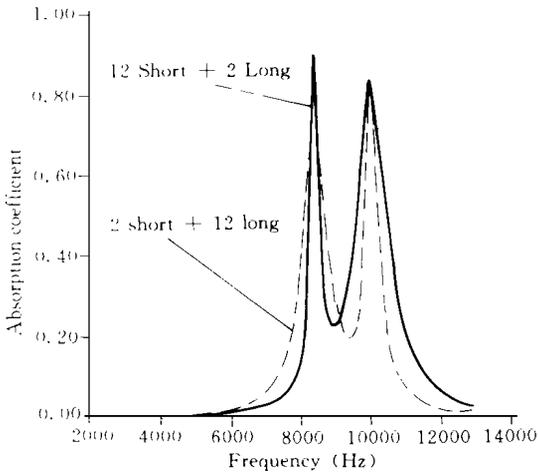


图 5 长短不同的两种声腔组合的吸收系数比较

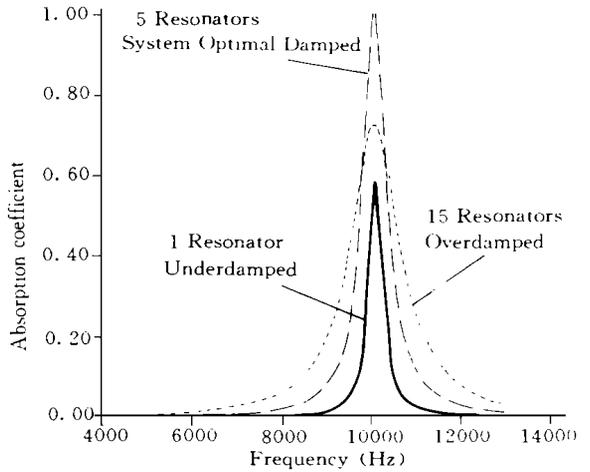


图 6 不同数目的声腔吸收特性比较

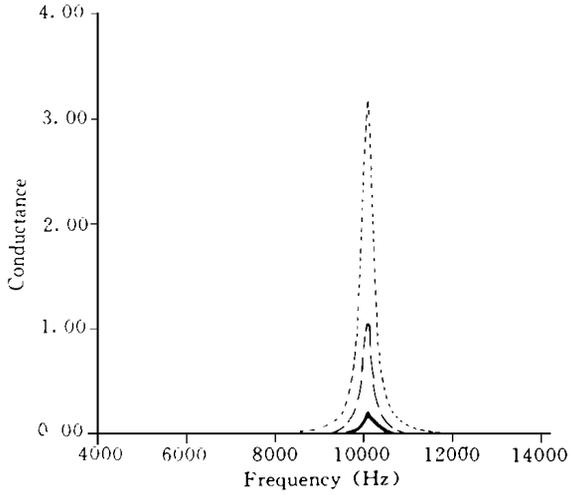


图 7 不同数目的声腔声导比较

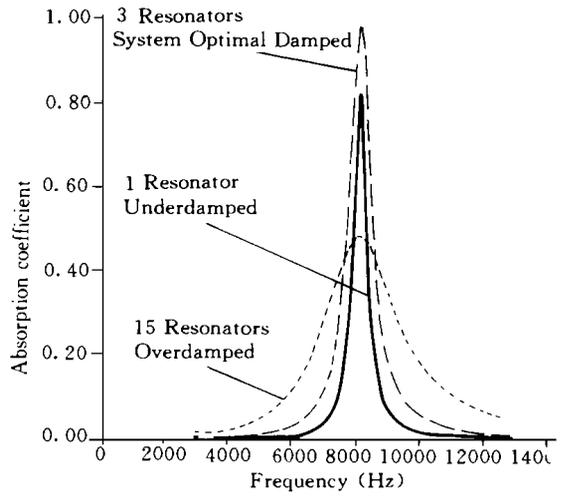


图 8 不同数目的赫姆霍兹声腔对应的吸收系数比较

## 参考文献

- 1 朱宁昌, 张宝炯译, 液体推进剂火箭发动机不稳定燃烧, 北京: 国防工业出版社, 1980
- 2 Morse PM, Ingard K U. Theoretical Acoustics. Princeton Univ. Press, NJ, 1968
- 3 Langel G, Laudien E, et al. Combustion stability characteristic of the Ariane 5 L7 engine. IAF-91-250
- 4 Bert P, Hannum N P and Russell M. On the design of acoustic liners for rocket engines. Helmholtz resonators evaluated with a rocket combustor. NASA TN-D-6171, 1969
- 5 Yang V, Anderson W E. Liquid Rocket Engine Combustion Instability. Pennsylvania State Univ. Pennsylvania, 1995