

固体火箭发动机实际燃速 常数的计算*

余 贞 勇

(陕西动力机械研究所, 西安, 710000)

摘 要: 根据试车数据, 对全尺寸发动机和标准发动机瞬时燃速进行了计算。利用参数辨识技术, 确定了维也里燃烧公式 ($r=ap^n$) 里的常数。计算结果表明: 对应用在不同发动机中的同一种推进剂来说, 其燃速系数 a 和压强指数 n 是不同的。探讨了不同发动机燃速常数变化的原因以及规律性。提供了分析全尺寸发动机、标准发动机之间燃速相关性的新方法。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 推进剂燃速, 参数识别, 相关特性

分类号: V435.12

CALCULATION OF ACTUAL BURNING RATE CONSTANT IN SOLID ROCKET MOTOR

Yu Zhengyong

(Shanxi Power Mechanical Institute, Xi'an, 710000)

Abstract: Based on the data from the motors firing, the transient burning rate of the full-scale motor and the standard testing motors is calculated. By using the technique of parameter identification, the constants in the Vieille Burning Rate Formula is determined. The determined results show that burning rate coefficient and burning rate pressure exponent are not only related to propellant characteristic, but also related to the motor parameters. So, the regularity and cause of variation of the burning rate coefficient and burning rate pressure exponent are analysed. And a new approach to analyse the correlation between full-scale motor and the standard testing motor is provided. And, the result of calculation is in good agreement with experimental result.

Keywords: Solid propellant rocket engine, Propellant burning rate, Parameter identification, Correlation property.

* 本文 1993 年 7 月 9 日收到

1 前言

目前在工程上,是用标准发动机的平均燃速乘一个经验得来的修正系数来预示全尺寸发动机的平均燃速。此法没有揭示两者之间的相关性到底是受那些因素制约,缺乏理论依据,误差较大。

对使用同一种推进剂的不同发动机,由于各自的燃烧条件、装药及实际尺寸不同,因而即使使用的是同一种推进剂,它的能量的发挥与内弹道的特性也不相同,因而,各自的燃速特性也就不一样。

本文根据某型号发动机及其随机携带的 $\phi 315$ 和 $\phi 108$ 两类标准发动机的试车数据,对它们的燃速进行了计算。应用辨识技术,求出维也里燃速公式的燃速系数 a 和压强指数 n 的值,并对计算结果进行了分析,揭示出影响燃速的若干因素。

2 方法简介

假定发动机内推进剂燃速特性服从维也里指数定理,则平均燃速 $\bar{r}$ 可以由下式确定:

$$\bar{r} = a^{1/(1-n)} \left\{ \int_0^E [\rho_s C^* A_b(t) / A_t(t)]^{n/(1-n)} dt \right\} / E \quad (1)$$

式中 a 为燃速系数,体现了除压强以外的各因素对燃速的综合影响; C^* 为特征速度,表示推进剂在不同发动机中发挥出的能量水平; $A_b(t)$, $A_t(t)$ 为燃面积及喉面积的瞬时值,对确定的发动机来说这两项都是确定的; E 为药柱肉厚; ρ_s 为推进剂的密度,对确定的推进剂来说,它变化很小,假定为常数。

为了确定发动机平均燃速,必须先确定上式中诸参数。

2.1 瞬时喉部面积 $A_t(t)$ 的计算

用碳基材料喉衬的大发动机由于燃烧时间长,烧蚀量大,因而必须考虑喉部面积的变化。根据实测的压强-时间曲线和推力-时间曲线,由推力公式和喷管扩散段的面积比与压强比的关系式,考虑喷管的性能损失,可以获得喉部面积的变化规律。

对小发动机来说,由于燃烧时间短,可以假定喉部面积不变。

2.2 瞬时燃面的 $A_b(t)$ 确定

用通用坐标法计算出药柱在各个瞬间的几何燃面,并根据实测压强及喉径公式反算,经过修正得到理论燃面 $A_b(t)$ 。

2.3 特征速度 C^*

根据喉部面积 $A_t(t)$,由实测压强及推进剂重量便可算得特征速度。一种推进剂在不同发动机上使用,其特征速度是不相同的。

2.4 瞬时燃速的计算^[1]

由发动机工作过程中燃烧室内质量守恒、能量守恒和状态方程可推导出

$$r = (p A_t / C^* + \rho_g V \dot{p} / p) / [A_b (\rho_s - \rho_g)] \quad (2)$$

式中 ρ_g 为燃气密度; V 为燃烧室瞬时容积。

根据求得的喉面变化规律及选定的理论燃面试车实测的压强-时间关系,以及实测的特征速度 C^* , 用 (2) 式可求得燃速随时间的变化规律 $r_{\text{exi}}-t$ 。

2.5 瞬时燃速计算结果检验

在确定的燃烧时间内^[2], 若计算出的肉厚、平均燃速与实际肉厚、平均燃速相符, 就可以认为计算是准确的, 因而所得到的燃速特性是准确的。肉厚及平均燃速的计算公式分别为:

$$e = \int_0^{T_b} r_{\text{exi}} dt \quad \bar{r} = e/T_b$$

2.6 a, n 的确定, 燃速辨识模型的建立

瞬时平均燃速: 在 $t \sim t + \Delta t$ 时刻内, 假定燃速符合维也里指数定律 $r = ap^n$ 。在 Δt 时刻内, 可以认为 a, n 为常数, 则在 $t \sim t + \Delta t$ 时刻内瞬时燃速为 $r_i(t)$, 有

$$r_i(t) = a[p_i(t)]^n \quad (3)$$

假设压强变化率很小, $dp/dt = 0$, 则可引用平衡压强公式

$$p_i(t) = [a\rho_s C^* A_b(t)/A_i(t)]^{1/(1-n)} \quad (4)$$

这样, 在燃烧时间内, 得瞬时燃速 r_i 的变化模型

$$r_i = a^{1/(1-n)} (\rho_s C^* A_b(i)/A_i(i))^{n/(1-n)} \quad (5)$$

式中 $A_b(i), A_i(i)$ 分别为 t 时刻的燃面和喉面, a, n 将采用辨识方法确定。

燃速辨识问题可以描述为: 根据从试车数据计算出来的燃速-时间数据 $r_{\text{exi}}-t$, 选模型式 (5) 中的 a, n , 使燃速残差平方和为最小, 即 $Q = \sum (r_{\text{exi}} - r_i^2)$, 取得最小值。

本文中的辨识方法采用 Marquardt 的阻尼最小二乘法^[3]。

3 计算结果及分析

某型号的全尺寸发动机及其两种不同直径的标准发动机 ($\phi 315, \phi 108$)^[4,5] 的有关参数列于表 1。

发动机的实际肉厚与计算肉厚、实际平均燃速与计算平均燃速的计算结果列于表 2。由于试车数据不是连续的, 因而计算燃烧时间和实际燃烧时间并不完全一样, 它们之间存在误差, 但它们之间的相对误差不超过 0.6%。

用 Marquardt 阻尼最小二乘法对燃速系数 a 和压强指数 n 进行辨识, 结果见表 3。在这里, 考虑了环境初温对推进剂燃速的影响。

表 1 大小发动机设计参数比较

发动机	装药形状	C^* m/s	药柱肉厚分数	A_b/A_i 平均值
全尺寸发动机	翼柱形装药	1562.4	≤ 0.37	165.07
$\phi 315$	圆管形内孔与两端面同时燃烧	1542.6	≤ 0.15	169.05
$\phi 108$	带喇叭口的圆形内孔燃烧药形	1550.2	≤ 0.22	162.99

注: 表 1 中, $C^*, A_b/A_i$ (平均值) 由几发试车数据的平均值得出

表 2 计算结果与实际结果的比较

发动机		实际肉厚、平均燃速		计算肉厚、平均燃速		相对误差	
C5		731.22	11.9127	736.0237	11.9758	0.653%	0.527%
φ315	1	43.81	11.534	43.7565	11.5789	0.122%	0.388%
	2	43.79	11.424	43.8527	11.4319	0.143%	0.069%
φ108	1	23.72	11.328	23.8429	11.3053	0.515%	0.201%
	2	23.72	11.456	23.6014	11.3796	0.503%	0.671%
	3	23.90	11.430	23.7298	11.3812	0.717%	0.429%
	4	23.80	11.479	24.0145	11.5621	0.893%	0.719%
	5	23.78	11.583	23.6874	11.5548	0.391%	0.244%
	6	23.78	11.185	23.6193	11.0941	0.680%	0.819%
	7	23.75	11.358	23.6663	11.2858	0.354%	0.640%

表 3 燃速系数、压强指数辨识结果

发动机			a_0	压强指数 n	预示的及实 测的平均燃 速相对误差	发动机			a_0	压强指数 n	预示的及实 测的平均燃 速相对误差	
全尺寸发动机			C3	0.0021973	0.38322	0.365%	$\phi 108$ 标准 发 动 机	C5 携 带	1	0.00347169	0.36084	1.409%
			C5	0.0022901	0.38145	0.945%			2	0.00345272	0.36017	0.765%
			C6	0.0023812	0.38069	0.877%			3	0.00345640	0.36069	0.235%
$\phi 315$ 标准 发 动 机	C3 推 带	1	0.00317985	0.36498	1.274%	4			0.00348889	0.36096	0.757%	
		2	0.00393894	0.35522	0.747%	5			0.00348619	0.36085	0.286%	
	C5 携 带	1	0.00330468	0.36394	0.167%	6			0.00344001	0.35966	1.267%	
		2	0.00338675	0.36326	1.146%	7			0.00347306	0.36035	0.203%	
	C6 携 带	1	0.00456953	0.35056	0.953%	C6 携 带		1	0.00363571	0.35871	0.858%	
		2	0.00479477	0.34913	0.932%			2	0.00366241	0.35941	1.219%	
$\phi 108$ 标准 发 动 机	C3 携 带	1	0.00362993	0.35859	0.882%			3	0.00365580	0.35924	1.799%	
		2	0.00363812	0.35883	0.784%			4	0.00367256	0.35971	0.571%	
		3	0.00363825	0.25884	1.287%			5	0.00363963	0.35876	0.118%	
		4	0.00362810	0.35848	0.136%			6	0.00366823	0.35962	0.383%	
		5	0.00366579	0.35953	1.019%			7	0.00365438	0.35915	0.349%	
		6	0.00365889	0.35929	0.663%							
		7	0.00373453	0.35989	0.885%							

根据式 (5), 假定 n 值不变, 则随着 $C^* \times A_b/A_i$ 值的增大, a 值减小, 在表 1 表 3 可以看出这一点; 根据表 2, 计算肉厚与实际肉厚间的相对误差不超过 0.9%, 计算平均燃速与实际平均燃速间的最大相对误差不超过 0.9%, 因而可以认为由试车数据计算出的燃速 r_{ex} 是符合实际的; 从表 3 的计算结果看, 预示平均燃速与实测平均燃速间的最大相对误差小于

1.3%，因而可以认为计算结果是可信的。

表 4 燃速系数、压强指数辨识结果统计

发 动 机	燃速系数 a_0		压强指数 n		备 注
	均 值	标准差	均 值	标准差	
全尺寸发动机	0.0022895	7.51×10^{-5}	0.38179	1.06×10^{-3}	3 发均值
$\phi 315$	0.0038624	6.30×10^{-4}	0.35785	6.50×10^{-3}	6 发均值
$\phi 108$	0.0035929	9.20×10^{-5}	0.35960	7.73×10^{-4}	21 发均值

4 全尺寸发动机、标准发动机之间燃速相关性分析

从 (5) 式可以看出，发动机燃速特性除了受燃速系数和压强指数的影响外，还与推进剂本身参数 (ρ_s)，发动机设计参数 (A_b, A_t) 和反映燃烧性能与燃烧条件的参数 (C^*) 等有关。

1) 对使用同一种推进剂的不同发动机来说，可以认为推进剂的密度不变。这样，燃速的差别便反映了燃速系数、压强指数、燃面、喉面和特征速度的差别。发动机试车后，燃面、喉面和特征速度和差别已知，扣除了这些差别后，它们的燃速特性差异便反应了发动机固有的对推进剂燃速系数 a 和压强指数 n 的影响。

2) 由表 4 可见：由同一设计状态的发动机各发试车数据计算出的燃速系数和压强指数基本相同。它们之间的差别主要是由诸多随机因素造成的。

3) 由表 3 可见，尽管 $\phi 108$ 、 $\phi 315$ 发动机尺寸有较大差异，但燃速系数和压强指数却变化不大，而与全尺寸发动机相比，燃速系数和压强指数却有较大变化。这说明：发动机直径大小对燃速系数和压强指数没有或仅有不大的影响，主要影响因素是药柱形状、弹道性能及燃烧条件的变化。对 $\phi 108$ 、 $\phi 315$ 发动机来说，尽管直径不一样，但它们的装药形状、药柱肉厚分数等决定弹道性能的因素却基本相同，因而它们的燃速系数和压强指数没有什么变化，燃速上的差别主要是由 C^* 、 $A_b(t)$ 、 $A_t(t)$ 及燃烧条件的微小差异造成的。但与全尺寸发动机相比，不仅燃烧条件不同，而且装药形状和内弹道性能也有较大差异，因而燃速系数和压强指数就有较大的差异。

4) 发动机试车以后，通过参数辨识，可以确定其燃速系数 a 和压强指数 n 。通过这一途径，就可以分别得到使用同一种推进剂的全尺寸发动机和标准发动机燃速的 a, n 值，从而提供了分析两种发动机之间燃速相关性及预示全尺寸发动机燃速的新方法。

参 考 文 献

- [1] 郭凤美等. 固体火箭发动机内弹道异常现象的计算机辅助分析. 固体火箭技术, 1989 (4)
- [2] QJ 1047-92. 固体火箭发动机压强-时间, 推力-时间数据处理规范
- [3] 谢如彪、姜培庆. 非线性数值分析. 上海: 上海交大出版社
- [4] GJB 293-87. $\phi 315$ 标准发动机型式与尺寸
- [5] Q/G 32-92. $\phi 127$ (内径 108) 标准试验发动机型式与尺寸