

固体火箭发动机缩比技术的应用与研究

王春利 周生国 袁曾凤

(北京理工大学)

摘要: 应用相似理论和固体火箭发动机缩比技术对多根装药固体火箭发动机的缩比设计进行了研究,并结合某导弹的弹射动力装置燃气发生器的缩比设计与研究,提出了一种新颖的缩比方法,即采用按装药根数缩比来代替常用的按药柱几何尺寸进行几何相似缩比,其缩比效果更具有特色。文中简要介绍燃气发生器的设计,较详细地叙述燃气发生器缩比设计方法,试验结果表明,文中介绍的缩比方法是正确的,准确预示了全尺寸燃气发生器的性能指标。

主题词: 相似性定理, 固体火箭发动机, 燃气发生器发动机, 试验

THE APPLICATION OF A NEW SCALE DOWN TECHNIQUE IN SOLID ROCKET MOTOR DESIGN

Wang Chunli Zhou Shengguo Yuan Zhengfeng

(Beijing Institute of Technology)

Abstract: The theory of dimensions and a new scale down technique in designing gas generator ejection power device are discussed in the paper. The new scale down method adopts the ratio of powder charge number instead of geometric ratio. The result show that it will be more accurate to use new scale down method for predicting the performance of full-size gas generator.

Keywords: Similarity theorem, Solid rocket engine, Gas generator engine, Test

符 号 表

α 燃速系数
 A 截面面积

C_D 流量系数
 D 直径

e	装药燃层肉厚		下 标
$\dot{G}$	燃气流量	tf	全尺寸的喷喉
k	绝热指数	tm	缩比的喷喉
L	长度	f	全尺寸的直径
N, n	装药根数	m	缩比的直径
n_1	比例尺	s	包覆
p	工作压强	n	不包覆
r	燃速	f_s	全尺寸的侧面包覆药柱
S	燃面	f_n	全尺寸的不包覆药柱
T, t	工作时间	b	终燃点
T_c	燃温	c	初始值
V	容积	g	自由容积
ρ_p	推进剂密度		

一、前 言

虽然计算机辅助设计和优化设计已普遍应用于固体火箭发动机设计,但试验研究是不可缺少的研制阶段。尤其是大尺寸的固体火箭发动机的试验研究,为节省研制经费和缩短研制周期,采用缩比设计与缩比试验研究是很有经济效益的研究方法。目前常见到的或者说传统的缩比方法是采用按药柱几何尺寸相似的方法进行缩比设计,比如多根装药的固体火箭发动机,缩比设计时往往是装药根数不变,只是将多根装药的几何尺寸按比例几何相似缩比。其结果时间缩比了, $p-t$ 曲线不能直观反映全尺寸发动机的 $p-t$ 关系,另外药柱加工制做又需制做缩比装药的模具。本文提出的多根装药发动机按装药根数缩比,其特点是缩比设计的 $p-t$ 曲线能直观预示全尺寸发动机的 $p-t$ 曲线,即两者的 $p-t$ 曲线关系相同,而且药形尺寸相同,研制过程中,只加工一种药形模具。使得经济效益更为显著。本文的缩比设计方法用于某导弹的弹射动力装置燃气发生器的缩比设计,经单项性能试验、联合性能试验和缩比弹的弹射性能试验,试验结果,其性能指标稳定,准确预示了全尺寸燃气发生器的性能。

二、全尺寸燃气发生器设计简述

根据某导弹弹射总体的战术技术要求,采用固体推进技术对全尺寸燃气发生器进行了结构设计并应用计算机辅助设计进行了性能计算,目的是为缩比设计提供初始设计参量和缩比设计性能指标。

经弹射总体方案论证和估算,确定了全尺寸燃气发生器的内弹道性能,即工作压强与时间的关系和流量与时间的关系。在燃气发生器的总体设计中,确定了燃气发生器的总体结构形式、主要结构尺寸、结构材料,选定了推进剂工作压强和膨胀比等。这些工作中,其推进剂的确定是关键的一步。要满足导弹弹射要求,在很短的工作时间内(不大于1秒)要求燃气发生器产生相当大的燃气流量,同时,为保证导弹在发射筒内加速运动,要求其流量变化关系应该是递增规律。所以,燃气发生器的装药应该是增面形的燃烧规律。我们选定的高燃

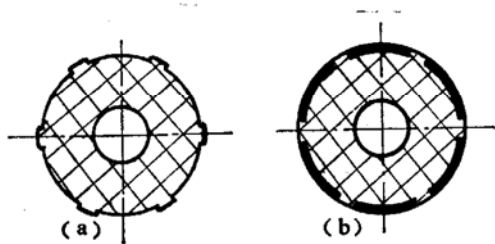


图1 药形截面示意图

速双基推进剂，其燃速为35mm/s(10MPa下)。

其装药为多根外凸齿形管状药，为满足要求的流量变化规律，通过调节凸齿对应的圆心角大小及齿间侧面包覆与不包覆的根数匹配来实现。图1(a)为侧面不包覆药柱截面，图1(b)为侧面包覆药柱截面。燃气发生器壳体可以重复使用。

三、缩比设计与计算

1. 缩比设计

缩比设计的关键是按缩比目的来设计比例尺。固体火箭发动机的缩比实验研究的理论基础是相似准则，这就要求缩比模型与原型之间要保证一系列相似准则，在数值上相等并建立无因次准则方程。而且要保证两者之间的工作特性和边界条件相同，如两者所用推进剂相同，工作压强相同，燃速相同等。它们的燃烧过程与流动过程必须符合相似准则且数值相等。

我们结合大尺寸的多根装药的燃气发生器缩比试验研究，综合试验研究目的、全尺寸结构的几何尺寸，并权衡经济效果和试验设备条件，采用按装药根数进行缩比，其实也可以理解为按横截面来缩比。考虑比例尺在3~5的范围，最后确定取其全尺寸燃气发生器13根装药的一根装药作为缩比燃气发生器的装药，其比例尺为 $n_1 = \sqrt{13}$ 。此方法对于多根装药的固体火箭发动机缩比比例尺一般表达式则为：

$$n_1 = \sqrt{n_f/n_m} \quad (1)$$

按全尺寸的多根装药根数进行缩比，而装药长度不改变，则缩比燃气发生器装药药形与全尺寸的药形完全相同。为了保证缩比燃气发生器的流量变化规律与全尺寸燃气发生器相同，对缩比燃气发生器的单根装药采用凸齿间侧面包覆与不包覆的长度比来反映全尺寸的装药凸齿间侧面包覆与不包覆的根数比，即 $L_s/L_n = n_{fs}/n_{fn}$ ；通过设计计算证明，缩比与全尺寸的工作压强与时间关系完全相同。因此，缩比的 $p-t$ 曲线非常直观地预示了全尺寸燃气发生器的 $p-t$ 关系。

确定了比例尺 n_1 ，就可以得到缩比与全尺寸二者设计参量之间的相似关系：工作时间相似 $n_t = n_1^0 = 1$ ；面积相似 $n_A = n_1^2$ ；装药质量相似 $n_{pm} = n_1^2$ ；燃气流量相似 $n_G = n_1^2$ ；推力相似 $n_F = n_1^2$ ；压强相似 $n_p = n_1^0 = 1$ ；总冲相似 $n_I = n_1^3$ 。可以看出，工作时间和工作压强均与比例尺无关。

2. 缩比计算

由前面缩比设计确定了比例尺和相似关系，便可以进行缩比计算。

(1) 燃烧温度场与流场相似。由相似准则，缩比与全尺寸二者的工作条件及边界条件必须相同。因此，它们的推进剂相同，工作压强相同。本缩比设计方法还得到工作时间相同。二者的燃烧过程及流动过程符合相似准则，并在数值上保证相同，诸如热力参数(C^* , T_p , ρ_p , K , C_f , μ , u_c , M , S , H ……等)相同。

(2) 几何尺寸相似。由确定的比例尺 n_1 ，得到了缩比燃气发生器和全尺寸燃气发生器

之间几何尺寸相似关系：燃烧室直径 $D_f/D_m = n_1$ ，喷喉尺寸 $A_{f1}/A_{sm} = n_1^2$ 。药柱几何尺寸相同，即药柱的外径 D 、次外径 D_1 、内径 d 、凸齿弧圆心角 ε 、齿间弧圆心角 θ 、凸齿个数 N 、药柱总长 L 皆相同。故缩比燃气发生器的结构尺寸及装药尺寸得到确定。

四、装药和内弹道性能的计算机辅助设计

燃气发生器的装药燃面变化和内弹道性能采用计算机辅助设计进行计算。其药柱燃面变化计算用通用的截面法进行二维装药计算机辅助设计。内弹道性能用“龙格-库塔”微分方程求得 $p-t$ 关系，进而求得 $\dot{G}-t$ 关系。

1. 药柱燃面变化规律计算

由于装药形面对称，则取 $(\varepsilon + \theta)/2$ 形面研究燃面变化。用截面法将 $(\varepsilon + \theta)/2$ 形面划分若干几何面积单元。见图2，(a)为齿间外面包覆药柱的 $(\varepsilon + \theta)/2$ 截面单元划分。(b)为不包覆的 $(\varepsilon + \theta)/2$ 截面单元划分。

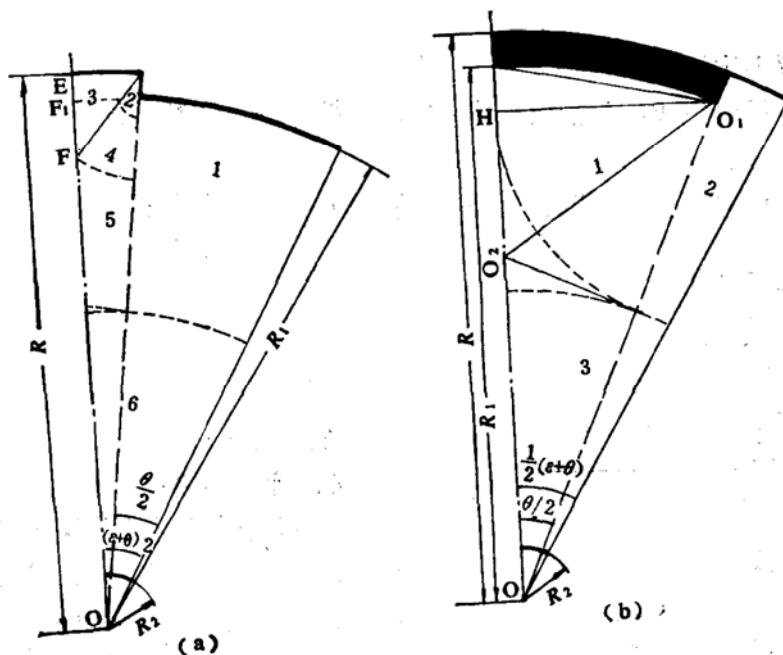


图2 $\frac{1}{2}(\varepsilon + \theta)$ 截面单元划分

(1) 计算燃烧周边及通道截面变化

外侧不包覆的 $(\varepsilon + \theta)/2$ 形面划分六个面积单元，外侧包覆的 $(\varepsilon + \theta)/2$ 形面划分三个面积单元。分别列出每个单元的周边表达式和通道变化表达式。

(2) 燃面计算

有了上述的周边表达式，将某一瞬时（即对应某一燃层肉厚 e ）迭加，再乘 $2N$ 倍可得到整个药形截面的周边，再乘以对应的药长，便可得到燃面变化。

2. 内弹道性能计算

内弹道性能计算包括工作压强-时间关系, 流量-时间关系及压冲, 此外为了设计联接结构, 还需计算推力。

本文用下列各式进行编程运算:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT_c \rho_p S}{V_g} \left(1 - \frac{C_D A_t}{\rho_p S a} p^{1-n} \right) \quad (2)$$

$$\Delta t_i = \frac{2(e_i - e_{i-1})}{a(p_{i-1}^n - p_i^n)} \quad (3)$$

$$t_i = \sum_{k=0}^{i-1} \Delta t_k \quad (4)$$

$$\dot{G} = C_D p A_t \quad (5)$$

$$I_p = \sum \frac{1}{2} (p_{i+1} + p_i) \Delta t_i \quad (6)$$

$$t = t_b + \frac{2V_c}{(k-1)RT_c C_D A_t} \left[\left(\frac{p}{p_b} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (7)$$

$$F = C_f p A_t \quad (8)$$

3. 内弹道程序设计

本程序由五个模块组成, 包括数据输入模块、控制模块、数据预处理模块、燃面计算模块、内弹道计算模块。

输入文件为: 推进剂性能参数、燃烧室及喷管几何尺寸参量、点火压强、药柱几何参数。

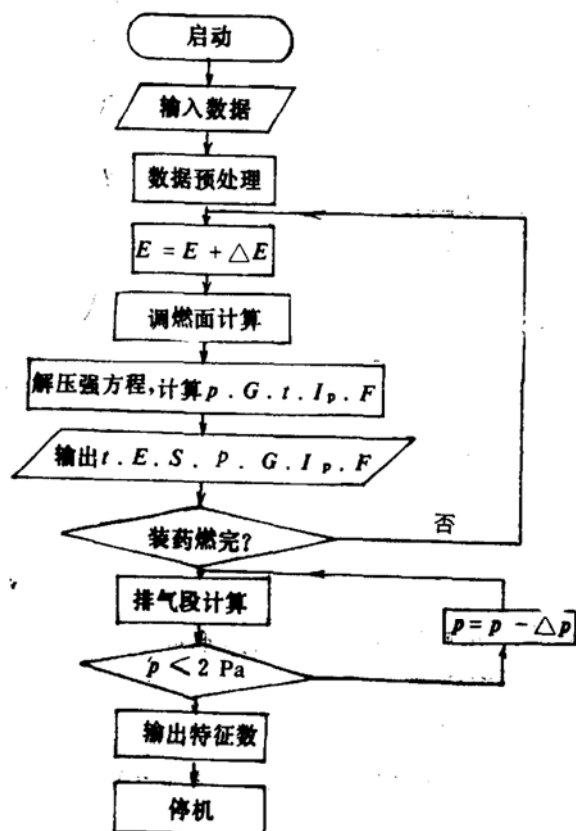


图3 程序框图

输出文件为: 时间 t 、燃层厚 E 、燃面 S 、工作压强 p 、流量 G 、压冲 I_p 、推力 F 以及特征点参数。

程序框图见图3。

4. 计算结果

在IBM微机运行计算, 得到的内弹道性能数据, 其缩比设计与全尺寸设计完全相似。其中工作压强-时间关系相同, 说明缩比设计准确预示了全尺寸的设计性能。其最大工作压强

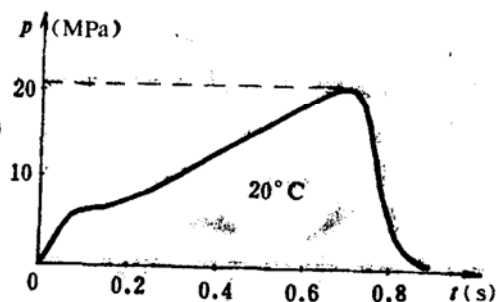


图4 缩比 $p-t$ 曲线

p_m 在工作温度 $+10^{\circ}\text{C}$ 、 $+20^{\circ}\text{C}$ 、 $+40^{\circ}\text{C}$ 下分别为 20.8MPa 、 22.0MPa 、 23.5MPa 。 $p-t$ 曲线见图4。

五、试验结果分析

缩比燃气发生器研制过程中,进行了一系列的试验研究,包括单项内弹道性能试验、联合性能试验、缩比弹射试验。试验结果表明:内弹道性能稳定,常温($+20^{\circ}\text{C}$)下联合试验一组5发最大工作压强数据为 21.6MPa 、 21.8MPa 、 22.2MPa 、 21.2MPa 、 21.7MPa 。平均值与理论设计值的相对偏差为 1.2% ,缩比弹射试验首发圆满成功,10发全部满足设计要求。

全尺寸燃气发生器内弹道性能稳定,全尺寸样弹弹射试验亦获圆满成功。设计与试验的 $p-t$ 曲线见图5。

由试验结果证明:本文提出的缩比方法和缩比设计是正确的。由于缩比设计与试验研究的成功,为全尺寸燃气发生器及弹射动力装置的设计提供了可靠的依据,节省了大量的研制经费并缩短了研制周期,取得了显著的经济效益。

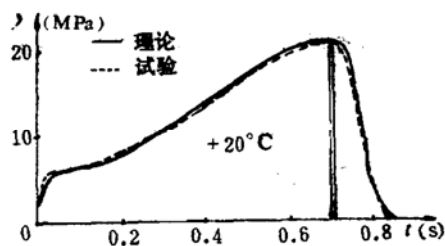


图5 全尺寸 $p-t$ 曲线

参 考 文 献

- (1) 王元有等编.固体火箭发动机设计.国防工业出版社,1984.3
- (2) 孙维申等编.固体火箭发动机原理.国防工业出版社,1983
- (3) 张廷良.相似理论在SRM模型实验中的应用.航天部三网七届技术交流会文集-1,1986
- (4) McKinnis J A and Connell A R O, AIAA-81-1577
- (5) Edquist C T, AIAA-80-1186
- (6) 王信,张中钦.二维药柱通用计算方法及程序.推进技术,1982(3)