

数字摄像在脉冲推力器性能分析中的应用^{*}

周海清, 张 平, 方蜀州, 李世鹏

(北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

摘 要: 为更详细地分析脉冲推力器的实际工作性能, 弥补传统推力和压力曲线分析的不足, 利用高速数字摄像仪拍摄了脉冲推力器尾焰图像, 根据图像特征进行了推力器工作性能的辅助分析, 结果表明: 尾焰图像特征可以反映脉冲推力器的点火启动性能和实际推力特性以及推力器的工作效率, 将图像分析与推力或压力分析相结合可以更全面地进行脉冲推力器性能分析, 有利于推力器设计性能的进一步提高。

关键词: 脉动式火箭发动机; 固体推进剂; 排气火焰; 高速摄影; 图像分析

中图分类号: V435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2004) 05-0477-04

Application on performances analysis of solid impulsive thruster with digital camera

ZHOU Hai-qing, ZHANG Ping, FANG Shu-zhou, LI Shi-peng

(School of Electromechanical Engineering, Beijing Inst. of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The solid propellant impulsive thruster performances were analyzed from the plume image with a high speed digital camera. With the high speed photography the impulsive thruster exhaust plume characteristics can show not only the ignition and thrust capability, but also the energy efficiency of the thruster. It is concluded that the impulsive thruster performances can be improved by using the plume image analysis, especially with the complement of combination of image analysis and thrust and/or pressure analysis.

Key words: Impulse rocket engine; Solid propellant; Exhaust flame; High speed photography; Image analysis

1 引 言

由于微型固体脉冲推力器结构微型化和极短的工作时间要求, 给推力器设计、试验和性能分析带来很大困难, 以往的测试分析手段主要是基于传统的推力和压力曲线数据^[1~3], 但短脉冲推力测量信号含多种干扰因素, 给确定实际推力性能带来很大困难, 有时因结构及尺寸限制无法测量推力器工作压力, 造成实际获取的试验信息过少, 给性能分析造成很大的难度和不确定性。为此希望能从其它途径获取相应的试验信息, 以便综合分析其工作性能, 进一步提高推力器性能和设计水平。推力器排气尾焰特征与其工作性能有着某种程度的相关性, 拍摄排气尾焰图像并

对其进行分析, 可增加试验信息量, 有益于对推力器工作性能的综合分析, 本文对此进行了初步探讨。

2 尾焰高速摄影结果及数据处理

进行推力试验的同时, 用 FASTCAM-Ultime 1024 型高速数字摄像仪拍摄了推力器排气全过程, 获得了连续排气尾焰图像, 试验共进行了四发, 有三发捕获到了火焰全过程。高速摄像仪的设置参数为: 第二发采样频率 1000 帧/秒, 每帧像素 512×512 ; 第三、四发采样频率 2000 帧/秒, 每帧像素 512×256 。

试验结果为, 第二发捕获尾焰帧数 11 帧, 第三发捕获 23 帧, 第四发捕获 30 帧, 这里仅将第三、四发捕获结果的典型图像按时间顺序列于图 1。

* 收稿日期: 2003-11-10; 修订日期: 2004-03-25。

基金项目: 国家部委重点预研项目 (10403010203)。

作者简介: 周海清 (1967—), 男, 博士生, 研究领域为火箭发动机技术, 弹药远程与控制技术。

E-mail: zhqing@bit.edu.cn

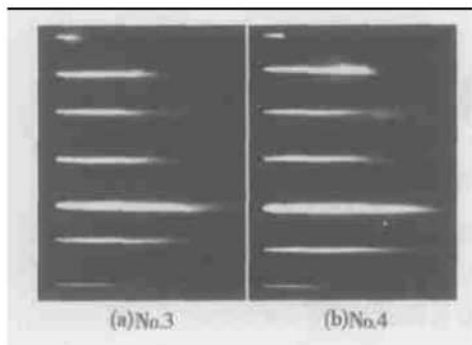


Fig. 1 Thrust plume image

脉冲火焰长度变化与脉冲推力器工作性能具有一定的关联性^[4], 本文按式(1)定义另一个脉冲火焰参数—光亮度积分 I_B , 后面将分析其与脉冲推力器工作性能的相关性。

$$I_B = \iint \beta(x, y) dA \quad (1)$$

式中 A 为图像面积, $B(x, y)$ 为尾焰光亮度

试验过程中未进行亮度标定, 本文将采用相对比较法进行计算分析。通过数字图像处理将尾焰图像转换为灰度图像, 并将灰度等级划分为 256 级, 其中 0 对应于黑暗区, 255 对应于最亮区, 即尾焰中心区, 灰度值越大表示该处的尾焰亮度越高。虽然没有参考标定, 但各位置点的灰度值仍然反应了该处的实际亮度, 灰度值大的位置其实际亮度也大。为计算方便, 这里规定单位灰度对应的实际光亮度为 1 坎德拉/ mm^2 (cd/mm^2), 由于以后的分析是基于相对比较, 所以这样的规定并不影响分析结果的合理性。经以上处理后可将式(1)转换成如式(2)所示的离散形式:

$$I_B = \sum_i B_i \Delta A_i \quad (2)$$

式中 ΔA_i 为微面积, B_i 为微面积 ΔA_i 所对应的相对光亮度。脉冲火焰长度和火焰光亮度积分变化同推力曲线的对照如图 2 所示。

3 试验结果分析

3.1 亮度积分与推力的关系

根据亮度积分的定义, 亮度积分的大小与尾焰的两个特征尺寸, 即尾焰直径和长度有密切关系, 相同尾焰亮度情况下, 亮度积分值随尾焰直径和长度的增大而增大, 而尾焰直径和长度又与发动机排气流量和排气速度大小相关, 对于确定的喷管结构尺寸, 当排气流量大排气速度高时, 尾焰也相应地具有较大的直径和长度, 结合火箭发动机推力表达式

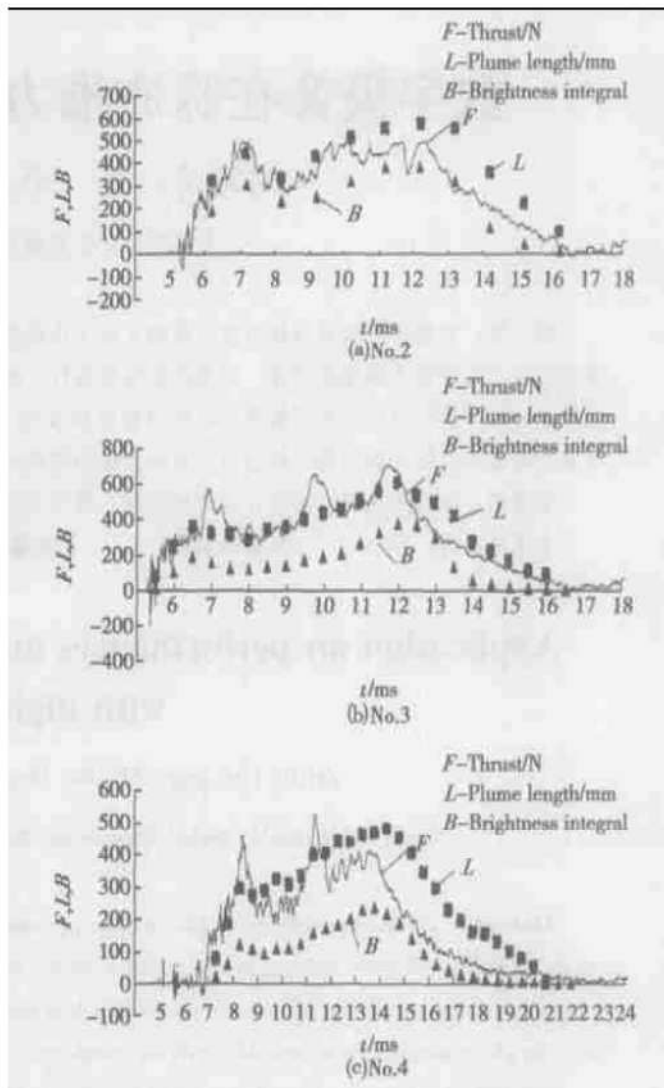


Fig. 2 Variety of the thrust plume length and brightness

$$F = \dot{m} u_e + A_e(p_e - p_a) \quad (3)$$

可以看到尾焰特征尺寸与动推力项 $\dot{m} u_e$ 是相关的, 而动推力一般占总推力的 90% 以上, 因此尾焰亮度积分是发动机推大小的一种间接表征。很明显, 对于确定的发动机结构和设计参数, 尾焰亮度积分大则表明发动机此时产生的推力也较大, 在确定的拍摄条件下, 如确定的背景光亮度, 确定的采样频率等, 原理上可以通过线性或非线性回归的方法确定尾焰亮度积分和发动机推力之间的定量关系。这种定量关系在某些情况下对发动机的设计有重要意义, 如在研制毫米级以下的微推力器时^[5-6], 因其推力甚小, 为 mN 级, 推力测量非常困难, 测量装置的研制周期很长, 这样, 可以采用高速摄影拍摄尾焰图像, 再根据利用其它类似发动机所获得的尾焰亮度积分和推力间的定量关系来初步确定微推器的推力和冲量大小。

本文首次使用的 FASTCAM-Uluma 1024 高速数字摄像机最高采样频率为 2500 帧/秒, 采样频率提高

后,其亮度敏感性下降,只有较高亮度的物体才能被捕获,其拍摄的图像亮度值是随采样频率而变化的,因此,要得到推力与亮度积分间的定量关系,必须进行精确的亮度标定,因所设计的亮度标定装置尚未完成加工调试,所以本次试验未进行亮度标定,且本次的试验样本量较少,因此未进行定量关系处理,随着发动机工作性能的进一步稳定和试验样本量的增加以及亮度标定技术的解决,推力大小和尾焰亮度积分间的定量关系是可以确定的。

3.2 尾焰特征与推力器工作过程特性

从图2可以看到,火焰长度和火焰亮度积分变化总体上与推力变化趋势相同,但不完全吻合,火焰长度和火焰亮度积分变化较为平稳,尤其是火焰亮度积分变化更为平稳,而推力曲线的变化较为剧烈,在推力曲线中部出现很高的峰值,而火焰长度和火焰亮度积分在此变化并不大,尤其是火焰亮度积分几乎是平缓地通过推力中间峰值段。火焰长度和火焰亮度积分变化基本上与理论计算的推力曲线(图3)变化趋势相吻合。由于尾焰亮度图像是在非接触条件下拍摄的,图像信号中不含有如电磁和机械振荡等干扰信号,应该是推力器实际工况较真实的反映,再结合亮度积分变化基本上与理论计算的推力曲线变化趋势相吻合这一情况,推力器的实际工况可能不象推力曲线所反映的那样复杂,造成推力曲线复杂变化的原因可能有多种,也不排除推力试验台的结构和参数设计以及安装调试问题,对短脉冲推力的测量技术还有必要做更系统的分析。

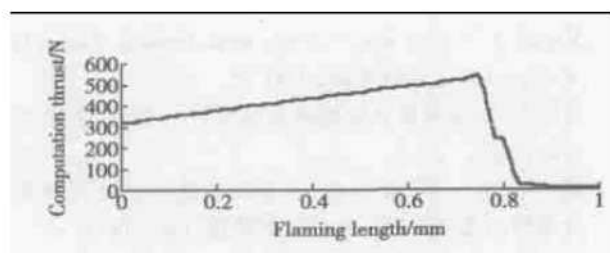


Fig. 3 Thrust force calculation

3.3 尾焰特征与推力器点火启动过程

为清楚起见,分别将图1(a)(第三发)中的两幅图像和对应的图1(b)(第四发)中的两幅图像做梯度变换后示于图4,可以看到两者的尾焰特征有明显的不同,首先两者的中心主火焰长度不同,第三发比第四发长,另外,中心主火焰外部的飞散火焰不同,第三发的飞散火焰远多于第四发的飞散火焰。试验所用

推进剂是一种AP改性双基推进剂,而试验用点火器所用的点火药配方中含有较多的可燃金属粉,中心主火焰外部的飞散火焰主要是点火器装药燃烧后产生的大量金属氧化物粒子所形成,金属氧化物粒子受到强烈湍流作用,再加之后续高速粒子的碰撞,使其产生了较大的侧向速度,致使其飞离中心主火焰而形成了粒子飞散火焰,如果点火药瞬间完全燃烧,将产生大量氧化镁粒子,形成较强的飞散火焰,因此飞散火焰的强弱间接地反映了点火器装药燃烧的完全性,同时也反映了点火启动过程的性能好坏,图4显示了第三发的点火器工作较为正常,其点火药燃烧较为完全,形成了较强的飞散火焰,而第四发与第三发相比,其飞散火焰要弱得多,说明点火药未能瞬时燃烧完全,点火启动过程变坏,第三发中心主火焰长度比第四发长也说明前者的点火启动过程正常,点火药完全燃烧,主装药瞬间全面点燃,主装药燃气形成较长的中心主火焰,而第四发中心主火焰较短,说明主装药未能瞬时点燃,主要还是点火器非正常工作所致。

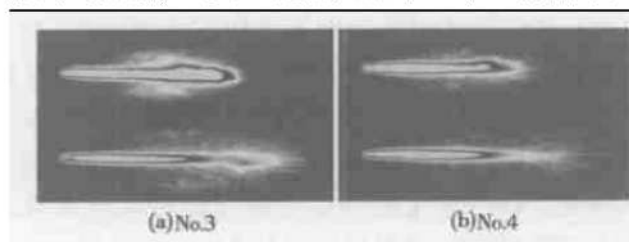


Fig. 4 Comparison of the thrust plume length and brightness

3.4 尾焰特征与推力器工作效率

尾焰亮度积分的时间累积 ($\sum I_B \Delta t$) 与推力器的能量释放特性具有相关性,第三发和第四发尾焰亮度积分的时间累积分别为 $1.76 \times 10^7 \text{ cd} \cdot \text{s}$ 和 $1.4 \times 10^7 \text{ cd} \cdot \text{s}$,后者比前者小20%;第三发的总冲量为 $3.7 \text{ N} \cdot \text{s}$,第四发的总冲量为 $3.0 \text{ N} \cdot \text{s}$,后者比前者小19%,第四发与第三发相比,其亮度积分损失和总冲量损失的百分比几乎相同,这一事实表明尾焰亮度积分确与推力相关,亮度积分的时间累积可以间接反映推力器总冲量,根据亮度积分的时间累积可以判断推力器的工作效率。

第四发试验实际上进行了两次点火,第一次加电未能点着,间隔一段时间后二次加电才点火启动,而且启动过程缓慢,未能实现压力的瞬时升高。短脉冲推力器的点火启动过程中存在很强烈的瞬态燃烧现象^[2,3,7],当点火启动过程缓慢时,瞬态燃烧效应被削

弱,推进剂燃速下降,同时造成工作压力降低,从而造成发动机推力比冲较低,因而达不到瞬时点火启动条件下的比冲等级,这可能是第四发总冲较低的主要原因。

微型脉冲推力器的工作特性对点火启动过程是非常敏感的,文献[8]曾利用推力曲线比较了推力器对点火药量的敏感特性,根据本文的高速摄影图像和亮度分析,脉冲推力器不仅对点火药量具有敏感性,而且在同样药量下,点火器的工作过程对推力器的内弹道性能也有非常大的影响。点火器工作过程不同反映在尾焰图像上的火焰结构也不同,进而有其光亮度积分的时间累积也不同,综合分析推力曲线特性和尾焰结构及光亮度特性,将更有助于脉冲推力器的性能改进和设计提高。

4 结 论

(1) 利用高速摄影拍摄排气尾焰图像,进行火焰结构特征分析和光亮度分析,能够提高分析的准确性。(2) 尾焰亮度积分和推力之间存在相关性,其定量关系可以在确定的条件下,根据试验数据通过线性或非线性回归来确定。(3) 通过火焰结构特征分析可判断点火启动过程的性能好坏以及点火器的瞬时点火性能。(4) 通过尾焰光亮度分析可以间接地反映推力器能量释放过程的品质特性。

参考文献:

- [1] 张 平,周生国,张训文,等.微型固体脉冲推力器内弹道性能的试验研究[J].推进技术,1997,18(2). (ZHANG Ping, ZHOU Sheng-guo, ZHANG Xunwen, et al. An experimental investigation on internal ballistic performance of a solid impulsive microthruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(2).)
- [2] 周海清.辐射式固体脉冲推力器工作过程研究[D].北京:北京理工大学,1995.
- [3] 李世鹏.短脉冲推力器的试验研究与理论分析[D].北京:北京理工大学,2001.
- [4] 赵承庆,姜 毅.气体射流动力学[M].北京:北京理工大学出版社,1998.
- [5] David H, Lewis Jr, Janson Siegfried W. Digital micropropulsion [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 80: 143~ 154.
- [6] Rossi C, Orioux S. Design, fabrication and modeling of solid propellant microrocket application to micropropulsion[J]. *Sensors and Actuators*, 2002, 99: 125~ 133.
- [7] 郭 K K. 萨默菲尔德 M 著.固体推进剂燃烧基础[M].朱荣贵等译.北京:宇航出版社,1994.
- [8] 张 平,李世鹏,刘玉群.点火药量对微型脉冲推力器内弹道性能的影响[J].航空动力学报,2003,18(1).

(编辑:朱立影)

(上接第 404 页)

- [5] 于达仁,牛 军,何保成,等.结合先验知识的涡喷发动机神经网络点火识别[J].推进技术,2003,24(3). (YU Da-ren, NIU Jun, HE Bao-cheng, et al. Identification of turbojet ignition based on neural network with a prior[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(3).)
- [6] 姜 涛,李应红.基于动态 RBF 网络的发动机起动过程模型辨识[J].航空动力学报,2002,17(3).
- [7] Vapnik V N. An overview of statistical learning theory[J]. *IEEE transactions on neural networks*, 1999, 10(5).

- [8] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. *Springer-Verlag, New-York*, 2000.
- [9] 乔晓明.支持向量机训练算法研究[D].西安:西安交通大学,2003.
- [10] 程 涛,祁 英,孟庆明.涡扇发动机主燃油控制系统建模与仿真研究[J].航空动力学报,1999,14(3).

(编辑:梅 瑛)