

燃气发生器结构及固体装药燃烧和双组元液体喷嘴雾化图像的特点编写了图像处理软件。

2 图像来源

在固体燃气发生器燃烧研究中,采用X射线高速实时荧屏分析系统。该系统由X射线发生器、图像增强仪、高增益微光摄像头、图像增强控制器、高速运动分析仪、监视器、数据采集分析仪、点火同步控制器和闭路监控设备等组成。X射线以30°顶角的圆锥体放射,窜过实验发动机,而后图像增强器将不同辐射强度分布的射线转换为可见荧光图像以便记录分析。视频信号UVX摄像头记录后传送给运动分析仪以数字形式存入记忆缓冲区中,并分两路送给图像处理工作站和监视器,以便实时观察和进一步开展图像处理,获取不透明高压燃烧器内的瞬变过程和定量参数。

在双组元液体喷嘴雾化特性实验中,没有采用X射线源。在开放环境中利用偏光照明雾化区扇形截面,直接由微光摄像头拍摄得到。图像记录速度为6000幅/秒。

3 处理方法及结果

3.1 U型装药燃气发生器燃烧过程图像分析

对图像的每一条模糊边缘来说都存在一最佳检测尺寸,用恒定不变的检测尺寸是不可能将边缘全部清楚地显示出来的。在图像边缘检测处理过程中,本文采用了最佳滤波和自动门限的方法,获得了较好的检测效果。

每一特定的边缘存在一个最佳滤波器尺度,衡量边缘检测算子的性能指标为:边缘点处的信噪比 SNR ,噪声引起的边缘偏移的均方值 $E[\Delta x^2]$,和噪声边缘引起的伪边缘点的平均距离 x_{ave} 。

$$SNR = 1.13 \frac{\alpha^2}{\sigma_n^2} \sigma, \quad E[\Delta x^2] = 1.33 \frac{\sigma_n^2}{\alpha^2} \sigma, \quad \lambda = \frac{1}{x_{ave}} = \frac{0.423}{\sigma} \quad (1)$$

其中 σ_n^2 为噪声的均方功率, α 为边缘的幅值, σ 为边缘检测算子的尺度。

在图像边缘提取时希望 SNR 要大,后两个指标要小,但对 σ 有不同的要求。为此引入最佳目标函数 $f(\sigma)$:

$$f(\sigma) = k^2 \lambda + E[\Delta x^2] \quad (2)$$

式中 k^2 是权系数平衡量。令 $f'(\sigma) = 0$,得

$$\sigma_{op} = 0.56 k \alpha / \sigma_n \quad (3)$$

下标 op 为最优值。

针对燃气发生器固体装药的燃烧图像,可用最佳滤波尺度对图像进行噪声滤除,通过梯度取阈值办法来提取边缘。本文选用各向同性的检测算子(拉普拉斯算子),其数学描述如下:

$$g(i, j) = 4y(i, j) - y(i+1, j) - y(i-1, j) - y(i, j+1) - y(i, j-1) \quad (4)$$

$$\text{卷积表达式为:} \quad g(i, j) = \sum_{r=-k}^k \sum_{s=-l}^l y(i-r, j-s) \mathbf{H}(r, s) \quad (5)$$

式(4), (5)中 $g(i, j)$ 表示边缘的梯度, $y(i, j)$ 为图像像素灰度值, $\mathbf{H}(r, s)$ 表示卷积模板矩阵。

最佳阈值的选取由自动门限选择子函数来实现。图像边缘提取的流程如下:需处理的图像从KODAK高速运动分析仪缓存中读取动态序列图像,将MAW文件转换为标准的TIFF格式的图像,并用子函数读取图像数据;而后通过数据滤波处理、拉氏算子计算和图像自动门限处理,获得经过降噪和边缘增强后的图像。通过处理后的图像如图1所示(左图为实验原图,中图为处理后

图像, 右为 U 型燃气发生器结构简图)。

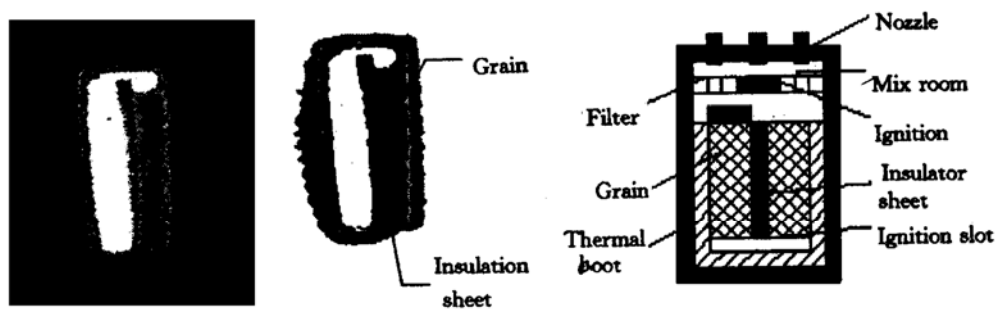


Fig. 1 Gas generator and its burning process image

可以看出, 经过处理的图像层次清晰、对比度强, 中间的绝热隔板显示清楚。用处理后的图像可较好地分析燃气发生器在工作过程中的内部瞬变现象 (如二级装药间的燃烧转换、装药表面推移、热隔板蹿火等过程), 并可定量测定推进剂的燃烧速率。通过分析处理后图像各横截面的灰度分布, 如图2所示, 可获得发动机各结构层次的厚度值。对燃气发生器中间绝热隔板的厚度 (图中的厚度单位是像素, 还需利用定标来确定其物理厚度), 可利用两个时刻的图像差计算出绝热隔板的平均烧蚀率。

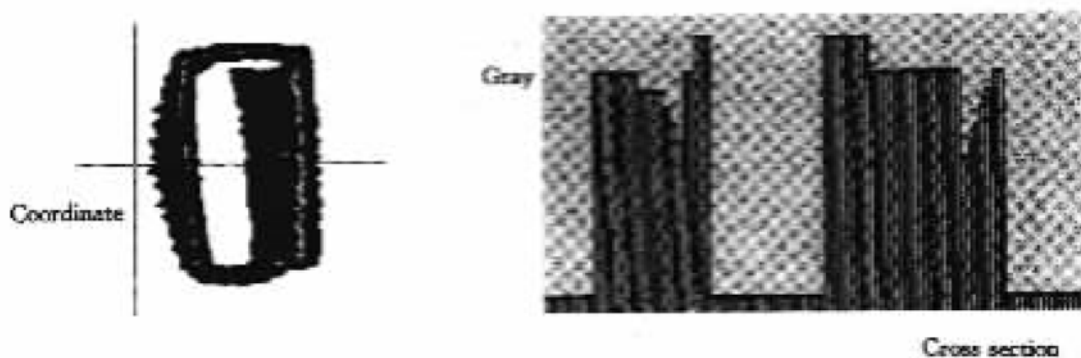


Fig. 2 Gray distribution of image cross section

3.2 喷嘴雾化图像分析

液体喷嘴喷出的射流在内力和外力的作用下破碎成不同尺寸的液滴。通常用以下指标来表示雾化特性: 雾化角、液滴的最大直径、液滴的平均直径、液滴尺寸的分布函数和喷雾速度等。雾化质量的好坏直接影响喷嘴性能, 从而影响液体火箭发动机的燃烧性能。

本研究对某型号液体发动机喷嘴的雾化机理进行了实验测定。该喷嘴带有两个液膜冷却孔和两个射流撞击孔, 雾滴由两股射流撞击产生。喷雾粒子图通过微光摄影机摄取, 图像中夹杂着较多的噪声。为得到一幅三层次的处理图像 (黑色的背影, 白色的可视粒子以及蓝色的不可视粒子), 本文采用了二次边缘提取的方法。

首先, 利用中值滤波对图像进行噪声滤除。用一窗口 W 在图像上进行扫描, 把窗口内包含的图像素按灰度级升降序排列起来, 取灰度值居中的象素为窗口中心的灰度。中值滤波的优点在于消除噪声的同时, 还能保护边界信息。其数学描述为:

$$y(m, n) = \text{Median}[y(m - k, n - l)], y(k, l) \in W \quad (6)$$

噪声平滑后,仍然采用梯度取阈值的办法来提取边缘。选取适当的阈值,并将边缘颜色置为白色,非边缘区域采用伪彩色显示,因粒子内部的灰度等级较高,经伪彩色处理后仍然为白色,这样灰度等级较高的可视粒子被清楚地显示出来,至此即完成了图像的一次边缘提取。考虑到还有一部分粒子其灰度等级较低,应对灰度等级居中的象素点再进行一次中值滤波,并利用拉普拉斯算子取阈值的办法将粒子轮廓勾勒出来,并用蓝色填充其内。这样把细小粒子的分布区域描述了出来,完成了图像的二次边缘提取。具体的处理流程如下:读取高速运动图像,将MAW图像格式转变为TIF图像,以 3×3 象素为单位进行中值滤波,并进行灰度梯度阈值化处理,获得灰度等级比较高的可视粒子。对于非可视粒子,再进行双中值滤波,并进行灰度阈值化处理,提取灰度等级较低的粒子。在此基础上,对不同象元的灰度进行着色,以提高粒子与背景间的色差。

为了对某一横截面的粒子进行定位和统计,本文设计了一个十字型的定位线,对粒子进行定位并给出当前粒子的位置,并对横线上的粒子数进行了统计。移动横坐标位置,利用灰度分布图可计算喷嘴的喷雾角和偏移量。此外,利用横截面上的灰度分布图还可以给出粒子的直径大小。通过处理可得到如图3所示的图像。

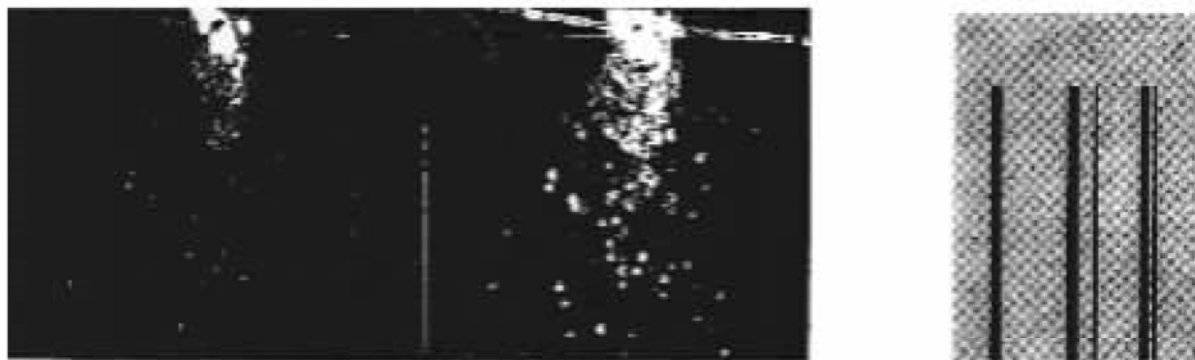


Fig. 3 The images of nozzle spray process and gray distribution of cross section

4 结束语

自适应和二次边缘提取的方法对分析模糊边缘图像是行之有效的,为开展火箭发动机工作过程实验研究提供了较好的图像处理方法,可降低对实验系统的要求,有效弥补实验图像层次模糊的不足。

由于原始图像的分辨率较低,在图像上可获的定量信息较少,今后应根据具体的物理对象,研究一种插值技术(如亚象元插值方法等)以提高图像的分辨率。

参 考 文 献

- 1 Canny J. A computational approach to edge detection. IEEE Trans on PAMI, 1986, 8 (6): 679-698
- 2 陈建国. 自适应边缘聚焦及其快速实现. 模式识别及人工智能, 1993, 6 (2)
- 3 赵荣椿编著. 数字图像处理导论. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- 4 吴一全, 朱兆达. 图像处理中阈值选取方法30年(1962~1992)的进展. 数据采集与处理, 1993, 8 (3)

JOURNAL OF PROPULSION TECHNOLOGY

Vol. 19 No. 2

Sum No. 98

Apr. 1998

(Bimonthly)

CONTENTS

ENGINE

- Simulation of Nonlinear Static Characteristics of a Liquid Oxygen/Kerosene Propellant Staged Combustion Rocket Engine via Combined Genetic Algorithms Liu Hongjun Zhang Enzhao Zhang Yulin et al (1)
- Feature Selection of Liquid Rocket Engine Fault Diagnosis Liu Bing Zhang Yulin (5)
- Development of an Integral Solid Rocket-Ramjet Engine Zhang Jiahua Hu Shunnan Gu Yanwu et al (9)
- Overload Test Method for the Structural Reliability Estimation of Solid Rocket Motors Zeng Yongsheng Dai Zuming Xie Weimin et al (14)
- Performance Analysis of Hydrocarbon-Fueled Scramjet Situ Ming (18)
- Fuel Regulation System of a Ramjet Engine Han Jiechu (23)
- Effects of Flight Acceleration on Erosion Characteristics of Forward Dome Insulation of Solid Rocket Motors Tian Weiping Yu Zhenyong Meng Qingfu et al (27)
- Experimental Study of Vibration Characteristic of Rotor Passing Through Critical Speed Yang Shenji Zhao Ming Yang Bingyu et al (30)
- Reliability Analysis of Blade with Neumann SFEM Nangong Zijun Wang Liang Zhang Duo (35)
- Investigations on Selecting Performance-Monitoring Parameters of Aeroengine Tang Genglin (38)
- Computation of Turbulent Field in Ducts with Stabilizers Using Zonal Grid Method Ye Taohong Guo Mingdao Chen Yiliang (43)
- Experimental Study and Analysis of Numerical Computation in the Flow Field of Film Cooling Xu Hongzhou Wang Shangjin Liu Songling et al (47)
- Monte-Carlo Stochastic Finite Element Analysis in the Fiber Winding Shell of Solid Rocket Motor Chen Shunxiang Wang Youjun Wang Benhua (54)
- CFD Mixing Analysis of Vortex Generator Jets Injected into Confined Crossflow in Rectangular Duct Wang Weidong (58)
- Static Deviation and Stability Control of a Pressure Reducer Zhang Bin (63)
- Test and Research of the Power of the Smoke Generator Pan Ningmin Zhang Liang (67)

PROPELLANT

- Studies on Vapor-Liquid-Equilibrium of Monomethylhydrazine Water Binary System Mi Zhengtao Li Deqing Zhou Jiye et al (72)
- Study on Condition of Elongation Increasing of HTPB Propellant Using MAPO Wang Beihai Liu Xue (76)
- Evaluation of Energy and Signature of XLDB Propellant with New Energetic Materials Guan Dalin Shan Wengang Feng Wei (81)
- Theoretic Calculation of the Burning Rate Characteristics of ADN and its Mixtures Yang Dong Zhao Fengqi Song Hongchang et al (87)
- Study of Thermal Stability of Hydroxyl Terminated Polybutadiene Wang Chunhua Weng Wujun Peng Wangda et al (92)

MEASURING TECHNIQUE

- Measurement of Heat Sink for Endothermic Fuels Li Zuguang Gao Han Li Gang et al (96)
- Estimation of Thrust Measurement Uncertainty for a Solid Rocket Motor Jing Fenglin Tao Hanming (100)
- Edge Detection Technique for Experimental Diagnosis in Rocket Motor He Guoqiang Liu Minhua Xiao Yumin et al (105)