

用 RTR 技术研究固体发动机燃烧室 中粒子运动轨迹

(Ⅱ) 图象处理技术应用*

黄生洪 肖育民 何国强

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072)

摘 要: 针对采用 RTR 技术获取固体火箭发动机 (SRM) 燃烧室中凝相粒子运动图象的特点, 应用了背景减影、图象增强、图象分割、噪声过滤、图象叠加等图象处理手段对其进行处理, 获得了较清晰的粒子运动轨迹图象。结果表明图象处理技术是开展利用 RTR 技术进行 SRM 二相流研究的关键环节之一。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 二相流, RTR 技术⁺, 图象处理

分类号: V435.12

EXPERIMENTAL STUDY OF PARTICLES TRAJECTORY IN FIRING SOLID ROCKET MOTOR WITH RTR TECHNIQUE

PART (Ⅱ) THE APPLICATION OF IMAGE PROCESSING TECHNIQUE

Huang Shenghong Xiao Yumin He Guoqiang

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: The digital image processing technique has been applied to deal with RTR images of moving condensed particles in a firing solid rocket motor chamber, which includes background subtraction, image enhancement, image segmentation, noise filtration and image addition. Relatively clear condensed particle trajectories have been obtained successfully. It is concluded that image processing technique is one of key links in investigation on two-phase flow of SRM using RTR technique.

Subject terms: Solid propellant rocket motor, Two phase flow, RTR technique⁺, Image processing

1 引 言

图像处理技术已迅速应用于各种科学和工程领域中^[1], 在 SRM 研究领域内的应用, 国外已有论述。宾夕法尼亚州立大学的 Kuo 等人在利用 RTR 研究真实发动机中 NOSOL-363 推进剂的燃速特性时, 正是应用了图象处理技术, 通过对实际试车 X 射线图象和标准 X 射线图象

* 收稿日期: 19961102, 修回日期: 19970206

的相似度计算, 获得了该推进剂的瞬态燃速。计算表明, 用该方法测量被测管状推进剂燃烧时的瞬时直径, 其误差小于 $0.4\text{mm}^{[2]}$ 。尽管如此, 很多研究者认为还是原始图像有较强的说服力。然而从实验获得的固体火箭发动机燃烧室中凝相粒子运动的 RTR 图像则有如下特点: (1) 单个粒子尺寸很小, 粒子信号本身就很微弱; (2) 目标图像并非如理论预计的那样清晰; (3) X 射线图像存在较强的噪声干扰; (4) 真实发动机的圆筒型壳体使得图像背景灰度变化不均匀。

因此, 很难直接从原始静态图像中分辨出粒子信息。虽然可在动态显示时看到粒子的运动, 但由于背景灰度的不均匀变化和较强的噪音干扰, 用现有的商用图象处理软件也无法跟踪, 从而很难获得粒子的运动轨迹。为此, 本文在应用图象处理技术从复杂的背景和噪音中提取粒子信息方面作了有益的尝试。

2 图象处理方法研究

金属粉末从推进剂燃烧表面进入燃气流时有两种状态: 凝聚成团和未能凝结成团。与此相对应, 实验获得的燃烧室内凝相粒子运动的 RTR 图像有两类: 较大粒子颗粒的运动图像和很多微小粒子沿相近轨迹运动而形成烟迹状图像。对于后者, 由于粒子信号很微弱, 又混杂在较强的噪音里, 目前还未能找到一种理想的算法将其从复杂的噪音和背景中提取出来。本文主要针对前一类图像进行处理, 图 1 显示了一幅实验中的原始 X 射线图像。

粒子颗粒图像处理主要解决如下问题: (1) 消除背景因素对粒子信息提取的影响; (2) 在消除背景因素后, 使粒子的信息突出以便检测; (3) 在分离粒子的同时尽量避免噪音干扰; (4) 分离出粒子信息后, 获取粒子在一段时间内的运动轨迹; (5) 验证所获粒子轨迹的可靠性。为此, 我们采取背景减影、图象增强、图象分割、邻域平均的算法滤除孤粒点噪声及图象叠加等方法捕捉粒子轨迹; 通过将处理结果和运动图象中肉眼观察到的粒子运动轨迹比较, 以及通过观察叠加不同幅处理图象所获轨迹的变化情况来判断处理结果的真伪。

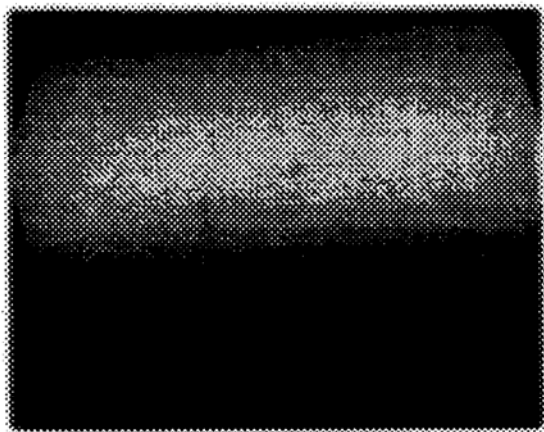


Fig. 1 Original image

2.1 背景减影

从粒子颗粒图像的灰度分布来看, 有: (1) 横向灰度分布较为均匀, 纵向灰度呈较大的起伏变化, 这和金属壳体的圆筒型结构是一致的; (2) 可能是壳体位置不水平, 横向灰度也并非理想的均匀一致, 而是左低右高; (3) 灰度并非连续变化, 而是凸凹不平, 这是金属粒子、燃气、壳体、噪声共同作用的结果。这就造成了如下的困难: (1) 背景灰度本身的复杂变化掩盖了粒子所引起的背景灰度变化, 直接用灰度梯度检测的方法来辨识粒子成为不可能; (2) 在如此复杂变化的背景下, 噪声和粒子显得更加难以区分。

用减背景方法处理, 即将对象图象的像素矩阵同相同条件下的背景图象的像素矩阵对应相减, 灰度分析和显示的结果表明: (1) 背景的灰度变化相对均匀了, 同时也消除了相同因素造成的一些图象畸变和失真; (2) 两幅图象的随机噪声可能叠加了, 另外, 由于振动而引起的两幅图象对应像素的错位可能引入新的“噪声”; (3) 粒子的信息仍不突出。然而, 背景

因素的消除降低了后面对粒子检测的难度。“噪声”的随机性较强,且大多呈孤立态,而粒子具有一定的形状、面积和运动规律,从而将“噪声”和粒子区分开来是可能的。我们也试图在进行本步处理以前对图象进行一种噪声平滑处理以减小噪声干扰,但由于其背景灰度的复杂变化使得判断噪声的阈值很难选取;并且,粒子的边缘也不可避免地被平滑了,粒子的信息更弱了。图 2 是经本步处理后的图象。

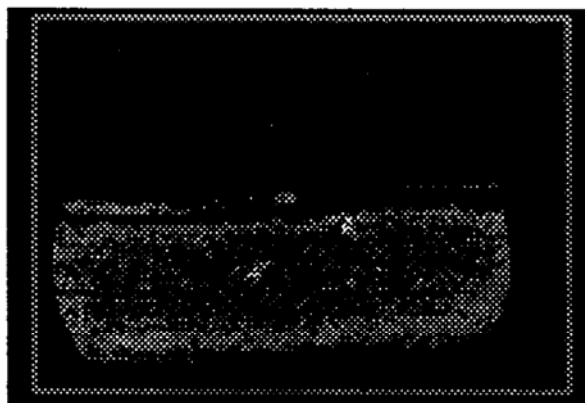


Fig. 2 Image after subtracting background

2.2 图象增强

用图象增强的方法可以在视觉上提高图象的对比度,使粒子从噪声和背景中“浮现”出来。本文用灰度线性扩展的方法增强图象。灰度变换的数学模型如下^[1]:

$$g(x,y) = \begin{cases} \frac{(d-c)[f(x,y)-a]}{b-a} + c & (a < f(x,y) < b) \\ c & (f(x,y) \geq a) \\ d & (f(x,y) \leq b) \end{cases}$$

由上可见灰度的线性变换并未改变原图象的已有信息,只是将其变换到另一个灰度区间进行观察。具体实现步骤是取出每行象素,求出其灰度变化区间,再将其变换到 0~255 区间内(对灰度变化区间较小的可不进行变换)。图 3 展示了经本步处理后的图象。

灰度分析和显示结果表明,变换后较小的灰度差别放大了,图象对比度加强了,粒子从噪声和背景中“浮现”出来。从处理后的图象可较清楚地确定粒子的位置并且可见粒子出现的地方灰度值较高,而其它噪声点尽管灰度值也较高,但大部分成孤立态。

2.3 图象的分割

灰度级的阈值分割是一种常用的从背景中检测出对象的图象分割法。经过对比度的展宽已使粒子、背景和噪声变得可区分,此时,只要选取一灰度阈值对图象进行过滤,即凡灰度值大于此阈值的点保留并置为黑点,而相反的点置为白点,则可将粒子和背景分割开来。

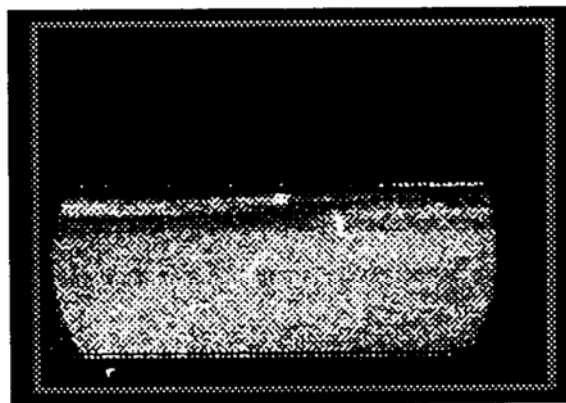


Fig. 3 Image after being enhanced

对图象进行灰度分析表明:背景灰度在 230 以下,以上是粒子和噪声点。然而,若以 230 作为分割阈值势必保留绝大多数噪声;为了在保留粒子信息的同时尽量抑制强度较低的噪声,我们在 230~250 之间选取了经反复实验后的实验值:242。图 4 显示了阈值分割后的结果图象。可见做为粒子的部分确实得到了保留;同时作为噪声的部分点也被保留了下来,它们大多成孤立点。当然,不排斥这些噪声点也可能是粒子点(微小粒子)。

2.4 邻域平均法滤孤粒点噪声

对阈值分割保留的较多孤粒点噪声,采用邻域平均取阈值的方法将其滤掉。邻域平均法

的数学表达式如下:

$$z(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m Q_i & (|f(x, y) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m Q_i| > \epsilon) \\ f(x, y) & (\text{其它}) \end{cases}$$

$f(x, y)$ 表示 (x, y) 点的实际灰度, Q_i ($i=1, 2, \dots, M$) 表示其邻接各点的灰度, M 是其邻域内邻接点总数。 ϵ 为控制阈值, 其选取可为图象灰度均方差的若干倍, 也可通过实验的方法选为总灰度级的一个百分数^[3]。对于阈值分割后的图象来说, 我们选 3×3 的邻域。当 $f(x, y)$ 和各邻接点灰度均值之差大于 ϵ 时, $f(x, y)$ 赋予背景值。 ϵ 的选取考虑到 3×3 邻域内噪声点出现的情况, 同时防止将信号点当作噪声点滤去, 并不取定, 而是在一定的范围内用实验的方法, 以人对处理结果的主观评判为依据选取。这个范围选取如下: (1) 对纯粹的孤立点噪声, 其差值为 240; (2) 如果邻域内有 1~2 个噪声点, 其差值为 180~210, 有三个以上噪声点的认为可能是粒子点或其边缘。所以 ϵ 取 180~240 之间的一实验值。可以理解这样作对粒子和装药及加粉界面的边缘点有一定的损害, 因为边缘点灰度变化也突出。这是邻域平均法本身的一个缺陷。图 5 是处理后的结果。

2.5 图象的叠加

由于摄像速度很高, 我们可以得到粒子各个时刻在空间运动的二维图象。经过以上处理粒子的位置已较为清楚的显示出来了。如果能将一段运动时间内的处理后图象叠加在一起, 则可得到这段时间内的运动轨迹图。同时, 根据粒子运动的规律性, 如果这些提取出来的粒子点经叠加后确实形成一条较光滑连续的曲线, 那么我们可以断定它们的确是目标粒子点而不是假象。具体操作如下: (1) 作一个和图象数据文件大小一样的背景数据文件; (2) 将处理后的图象数据文件和背景数据文件逐点比

较, 作“异或”操作, 即相同点不变, 相异点赋前景灰度; 如此继续, 直到处理完毕。图 6、图 7 是连续 12 幅和 20 幅图象经上述处理后叠加的结果图象, 可见从加粉界面出来的一条粒子轨迹已很清楚, 并且, 随着处理图象幅数的增加, 轨迹在加长。

3 结束语

通过对 RTR 图象应用图象处理技术, 获得了一般冷流模拟实验无法获得, 也是一般商用图象处理软件难以处理的真实点火发动机中凝相粒子运动的轨迹。在研究中, 我们感到在以下方面还存在不足: (1) 未能对感性趣区域进行局部处理; (2) 对微小粒子的处理还达不到理想的效果或者说还未找到一种将微小粒子“噪声”同其它噪声区别开来的合理算法; (3) 对

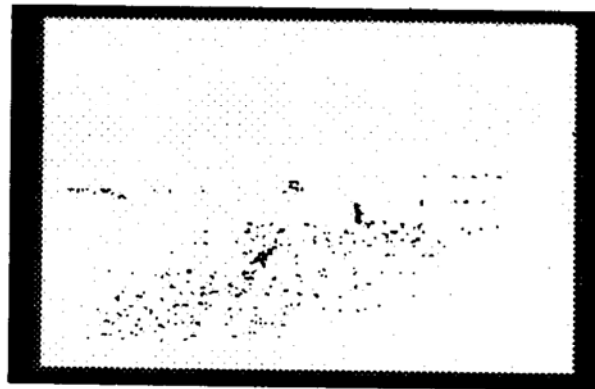


Fig. 4 Image after being segmented

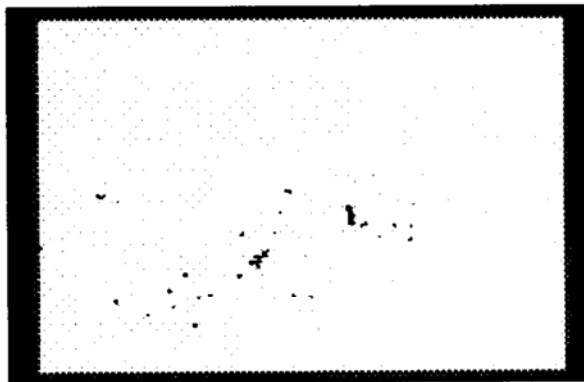


Fig. 5 Image after noise being filled



Fig. 6 Result image of adding 12
pre-processed image

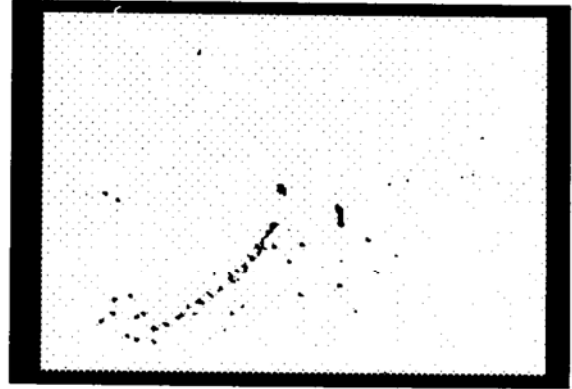


Fig. 7 Result image of adding 20
pre-processed image

较大粒子的检测也没有形成一种严密而合理的算法；(4) 未能在动态显示情况下实现对粒子的跟踪、识别。

参 考 文 献

- 1 王新成. 多媒体实用技术——图象分册. 成都:四川电子科技大学出版社,1991
- 2 Hsieh W H, Kuo K K. Erosive and strand burning of stick propellants, part I : measurements of burning rates and thermal wave structures. J PROPULSION, 1989(8,9)
- 3 赵荣椿, 等编著. 数字图像处理导论. 西安:西北工业大学出版社,1992
- 4 马建波著, 赵唯一审校. C 语言图象处理程序集. 北京:海洋出版社,1992

(上接第 18 页)

比变化的数量级分别为 0.04%、0.15% 和 4.0%。因此,可以看出推进剂利用系统对此类发动机性能的影响。Broyden 方法与小偏差方法的计算结果非常接近,但是这两种方法的计算结果之间的差别随着干扰因素相对变化量的增大而增大。

参 考 文 献

- 1 加洪 Γ Γ 著, 任汉芬, 颜子初译. 液体火箭发动机结构设计. 北京:宇航出版社,1992
- 2 Michael Binder. An RL10A-3-3A rocket engine model using the rocket transient simulator (ROCETS) software. AIAA 93-2357
- 3 吴建军, 张育林, 陈启智. 液体火箭发动机稳态故障仿真及分析. 推进技术, 1994(3)
- 4 沈赤兵, 吴建军, 陈启智. 干扰因素对液体火箭发动机性能的影响. 中国空间科学技术, 1997(2)
- 5 马欣 B A 著. 王通琦译. 液体火箭发动机试验研制的理论基础. 北京:国防工业出版社. 1978