

RTR 系统测试精度的改进^{*}

李 江 陈 剑 何国强 蔡体敏

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072)

摘 要: 对目前使用的 RTR 系统中存在的问题进行了分析, 指出影响 RTR 系统测试精度的主要原因是高速运动分析仪的图像分辨率太低及 X 射线系统本身造成的系统误差。总结了提高 RTR 系统测试精度的措施, 包括提高变压器的稳压性能, 改进实验器设计水平, 提高试车台架的刚性以及运用图像处理技术等, 将这些改进措施应用于 SRM 燃烧室凝相粒子运动规律的实验研究, 取得了比较明显的效果。

主题词: X 射线分析, 图像处理, 误差分析, 固体推进剂火箭发动机

分类号: V447.6, TB 867

IMPROVEMENT OF MEASUREMENT ACCURACY OF RTR SYSTEM

Li Jiang Chen Jian He Guoqiang Cai Timin

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

Abstract: The problems in the present RTR (X-ray Real-time Radiography) system were discussed. The main reasons decreasing the measurement accuracy of RTR system were the low image resolution of high speed motion analyzer and the system error caused by the X-ray system. Several available measures to improve the measurement accuracy of RTR system are summarized. These measures included the improvement of the stabilization property of voltage transformer, the enhancement of design level of test motor, the increase of the stiffness of test stand and the application of image processing techniques. These measures are used in the study of motion pattern of particles in SRM chamber and the measurement accuracy is improved obviously.

Subject terms: X-ray fluorescence analysis, Solid propellant rocket engine, Image processing, Error analysis

1 引 言

X 射线高速实时荧屏分析技术 (RTR) 是 80 年代以后发展起来的一种研究不透明高压燃烧器或发动机内复杂工作过程的非接触式诊断技术。较之常规测试手段, RTR 技术具有无可比拟的优点。美、英、法等国家已经陆续将此技术应用于固体火箭发动机 (SRM) 瞬态燃烧、绝热层烧蚀、粒子沉积等研究领域^[1~3]。我国燃烧、热结构与内流场国家重点实验室于 1995 年建成世界上第五套 RTR 系统, 开展了燃气发生器燃烧规律内视研究、固体推进剂侵蚀燃烧规律研究、SRM 凝相粒子运动规律研究和双脉冲发动机二次点火内视研究等大量的工作, 并取得了一定的成果^[4~8]。在实验研究中发现该系统存在一些缺陷, 影响了测试精度。本文对

* 收稿日期: 1998-07-31, 修回日期: 1999-01-28, 本课题为国家自然科学基金资助项目

RTR 系统存在的缺陷进行了分析,提出了改进措施,并将这些改进措施应用于 SRM 燃烧室凝相粒子运动规律的实验研究中,取得了比较满意的效果。

2 RTR 系统布局

图 1 是 RTR 系统总体布局示意图。X 射线由 X 射线发生器发出,呈 30° 的圆锥向外辐射,实验发动机处于辐射锥内,其轴线与 X 射线锥中心线位于同一平面。射线穿过发动机后由碘化铯接收屏接收,并将 X 射线转换为可见的荧光,由微光摄像机进行拍摄,微光摄像机通过电缆与 Kodak 高速运动分析仪连接。高速运动分析仪把模拟图像信号实时转化成数字图像信号并存入它的存储缓冲区中,实验结束以后可以把高速运动分析仪中的数字图像信号下载到计算机中,以便进行处理和分析。

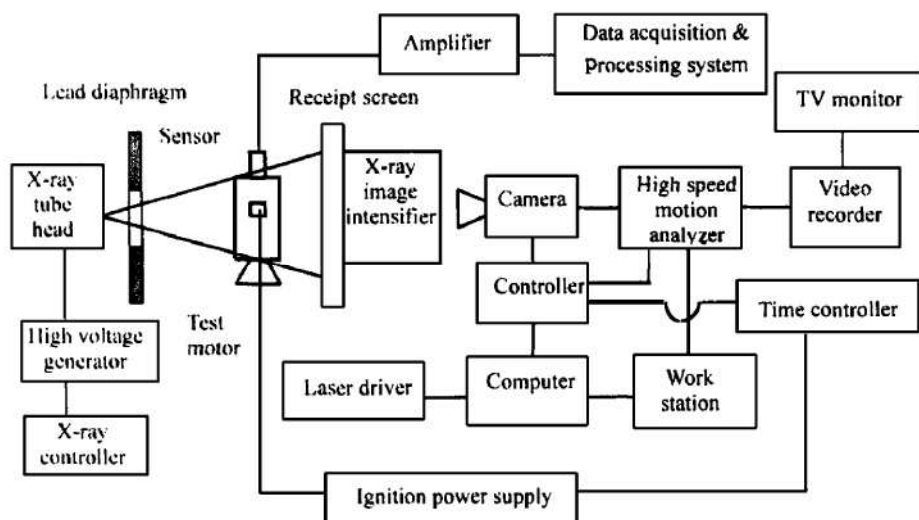


Fig. 1 RTR measurement system

为了理解 RTR 技术,有必要对 X 射线的成像原理作一简要介绍。X 射线路径上介质对射线的衰减规律可由 Beer 定理来描述: $I(\theta) = I_0 \exp[-mL(\theta)]$, 其中 I_0 为原射线强度; I 为透过介质后射线强度; m 为介质的线吸收系数; θ 为方位角; $L(\theta)$ 为某方向角上的介质厚度。

由上式可以看出,接受屏上 X 射线的强度分布,反映出 X 射线路径上介质对射线的衰减,也即反映了该路径上介质厚度及密度的变化,因此可以从该强度分布的变化来研究发动机内的工作过程。

Beer 定理建立在如下假设的基础上: (1) X 射线是经由一点源出发; (2) X 射线仅由于光电吸收才产生衰减; (3) 从 X 射线源发出的射线未经衰减到达图像增强仪接收屏幕时射线强度是均匀的。这是理想的情况,实际情况却并非如此。

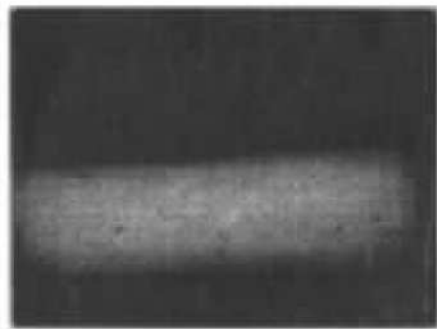


Fig. 2 Typical RTR image

3 RTR 系统的缺陷

若实验拍摄的图像质量比较差,对实验现象进行定量测量就比较困难。分析造成 RTR 图像质量较差的主要原因有:(1) 高速运动分析仪拍摄图像的分辨率比较低。受处理器内存和高速数据传输的限制,高速运动分析仪所拍摄的图像只有 239×192 个像素点,很难辨别微小物体或者物体的细观结构。(2) X 射线系统本身的缺陷造成的图像质量下降。表现在:X 射线头的聚焦点不是一点源,因而产生条纹或使图像不清晰;实验发动机及推进剂产生的 Compton 散射,这一点在射线强度大时特别明显;X 射线强度分布在接收屏幕上不均匀;电压波动引起 X 射线强度的波动;被测物体边缘效应。(3) 测试时发动机振动所造成的影响。

4 RTR 系统测量精度的改进方法

4.1 变压器稳压性能的改进

由于变压器稳压性能比较差,X 射线强度随着电压的波动也产生波动,出现了 RTR 图像整体灰度的明暗变化,实践中发现这种波动对系统的测试精度有明显的影响。例如,由于图像整体灰度的变化,目标图像的边缘也会发生一定程度的偏移,所以提高变压器的稳压性能非常关键。按目前实验要求,变压器输出电压的波动应该控制在千分之五。

4.2 实验装置的改进

火箭发动机或者燃烧器的圆形钢壳体对 X 射线的衰减比较大,如果当研究目标的密度和尺寸都比较小时,则在 RTR 图像上目标就非常模糊,很难辨别。另外,圆形壳体在 X 射线投影面上厚度分布不均匀,造成 RTR 图像背景灰度分布不均匀,远离中心线的区域较暗,靠近中心线的区域较亮。图 2 为 X 射线穿过发动机空壳体后的图像,从图中可以明显看到这一点,这种情况严重影响了对目标的识别和测量。采用方形发动机结构,并采用对 X 射线衰减较低的材料作壳体,才能减少壳体的影响,获得比较好的 RTR 图像。实践中经过不断改进,设计了一种多功能方形铝窗发动机,获得了比较好的效果。

发动机工作时会产生强烈的振动,振动使得图像产生位移,这种位移影响了测量的精度。实践中,对试车台架进行了改造,一方面增强对发动机的约束,另一方面增强了试车台架的刚度。这种改造取得了比较明显的效果,大大减少了发动机工作时的振动。

4.3 图像处理技术的应用

(1) 振动位移的校正。在发动机上安放一个圆形铅板标记,用胶粘在实验发动机上。在后期图像处理过程中,将此圆形标记为目标对其质心进行了跟踪,得到位移与时间的函数,然后根据这个函数对图像的位移进行校正。

(2) X 射线强度波动对图像影响的校正。可采用如下两种方法处理:

由变压器稳压性能差造成的 X 射线强度波动,其波动频率与交流电的频率基本一致,在将动态图像转化成单幅图像时,按交流电的周期 (0.02 s) 间隔转换即可在一定程度上消除电压波动的影响。该方法的优点是简便容易实现,缺点是只能消除周期性的波动,如研究高速运动对象,需要图像时间间隔小于 0.02 s 时,该法就不适用了。

根据序列图像的变化特点,选取一个采样区域,采样区内除由于 X 射线波动引起的灰度变化之外,再无其他的灰度变化。然后在序列图像中选择一幅作为标准图像,求出这幅图像采样区域灰度的平均值,对目标图像也求出采样区域灰度的平均值,与标准图像的灰度平均

值进行比较,然后按某一法则求出一个修正值,对目标图象的灰度按修正值进行整体修正。此法的优点是可以消除周期性的波动,缺点是采样区域很难选择。

(3) RTR 图像分辨率的提高。本文采用贝塞尔曲面拟合的亚象元插值放大技术,在放大图像的同时,提高图像的分辨率,从而提高了图像的测量精度。

(4) 噪声消除。为了拟制噪声采用低通滤波器,由于边缘轮廓含有大量的高频信息,所以在过滤噪声的同时也使边界变模糊。为了提取边界采用高通滤波器,但噪声也被增强。采用中值滤波较为适宜^[7]。中值滤波的原理是:用一窗口在图像上扫描,把窗口内包含的图像像素按灰度级升(降)序排列起来,取灰度值居中的像素灰度为窗口中心像素的灰度。

(5) 边缘检测。边缘和轮廓一般都位于灰度突变的地方,可以通过灰度差分的方法来提取边缘和轮廓。要想提取图像景物的边缘和轮廓,就必须找到那些各向同性的检测算子。实践中采用了梯度算子和拉普拉斯算子,获得比较满意的效果^[7-8]。

将 RTR 技术应用到 SRM 凝相粒子的运动中,发现由于凝相粒子尺寸非常小,在 RTR 图像上很难辨别粒子。在试车台架上采取上述措施,设计了方形铝窗实验发动机,编制了专用的图像处理软件,获得了较好的效果,图 3 为序列图像中的一幅,图 4 是经过图像处理后的粒子运动轨迹。

5 结 论

(1) 影响 RTR 系统测试精度的主要原因是高速运动分析仪的图像分辨率太低及由于 X 射线系统本身造成的系统误差;

(2) 通过提高变压器的稳压性能,改进实验器设计水平,提高试车台架的刚性以及运用图像处理技术等,可以提高 RTR 系统测试精度;

(3) 将改进措施应用到 SRM 燃烧室凝相粒子运动规律的实验研究中获得的比较满意的效果。



Fig. 3 Initial image

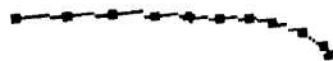


Fig. 4 Trajectory of particles in chamber

参 考 文 献

- 1 Ayris J P. Erosion burning in solid rocket motors. AIAA 90-2215
- 2 Char J M, Kuo K K, Hsieh K C. Observation of breakup processes of liquid jets using real-time x-ray radiography. AIAA 87-2137
- 3 Lemberger B, Sauve J. Inner view of solid rocket motor during static firing. AIAA 91-1949
- 4 何国强. 固体推进剂燃气发生器燃烧规律内视研究. 航空兵器, 1997 (2)
- 5 李 江, 肖育民, 张伟青, 等. 双脉冲固体火箭发动机二次点火内视研究. 推进技术, 1998, 19 (3)
- 6 肖育民, 何国强, 黄生洪, 等. 用 RTR 技术研究固体火箭发动机燃烧室中粒子运动轨迹 (I). 推进技术, 1997, 18 (5)
- 7 黄生宏, 肖育民, 何国强, 等. 用 RTR 技术研究固体火箭发动机燃烧室中粒子运动轨迹 (II). 推进技术, 1997, 18 (6)
- 8 何国强, 刘敏华, 肖育民, 等. 边缘检测技术在火箭发动机实验诊断中的应用. 推进技术, 1998, 19 (2)