

固体火箭发动机工业CT探测系统

郭 长 运

摘 要

本文提及x射线底片法和实时显象法检测固体发动机的局限性,介绍了具有优良探伤性能的固体发动机工业CT系统,简要推导和阐述了系统生成发动机薄断层密度分布图象原理、常用图象重建方法、系统基本组成和关键部件,评述了系统探测固体发动机的性能和检测各类缺陷的能力,讨论了其优缺点。对固体发动机工业CT系统的近期动向作了简要说明。

主题词: x射线检验, 固体火箭发动机

一、引 言

无论是x射线照相法,还是x射线实时显相系统,都是将物体内部不同深度的各个部分(包括各类缺陷)重叠显示在底片上或荧光屏上。因此,难以辨认伤情,甚至有时探测不出伤情。此外,射线照相和实时显相在一幅图相上不能区别是试件厚度造成的黑度差别,还是密度造成的黑度差别。两种方法的密度检测鉴别率也嫌过低。近年来发展起来的固体发动机工业CT(计算机计算层析x射线照相)技术则可以完全克服以上缺点。“层析x射线照相”即“使用x射线获取某一极薄断层内部结构图象,而无其他部分叠加”的意思。“计算机计算层析x射线照相”则是指通过计算机帮助完成层析x射线照相。基于射线通过物体不同密度部分时衰减不同的原理,通过采集在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内多个角度位置时x射线横穿发动机某一横断薄层所产生的大量射线衰减数据,并进行数学运算,固体发动机工业CT系统给出该断层清晰、直观的密度分布(因而也是内部组织结构)图象。探伤人员可以清楚地观察和判定发动机内部各类缺陷。图1即该系统检测某 $\phi 360$ 发动机的一个断层图例,它揭示出发动机在该断层部位的脱粘、药柱气孔和壳体缺陷。使用相应能量和剂量率的射线源,系统可有效检测具有不同壳体材料、不同装药以及不同形状和尺寸的各类发动机。固体发动机工业CT系统把固体发动机无损探伤工作提高到一个崭新水平。

二、固体发动机工业CT系统基本原理和组成

1. 基本原理

在图2中,固体发动机某一薄断层可近似为一横断面。十分纤细的x射线束在平面内沿x向直线L(图中未示出)穿越该断层后由检测器接收。接收强度为:

$$I_1 = I_0 e^{-\int_L \mu(x,y) dx} = I_0 e^{-\int_L k D(x,y) dx} \quad (1)$$

式中 I_0 ——射线源强度(常数),

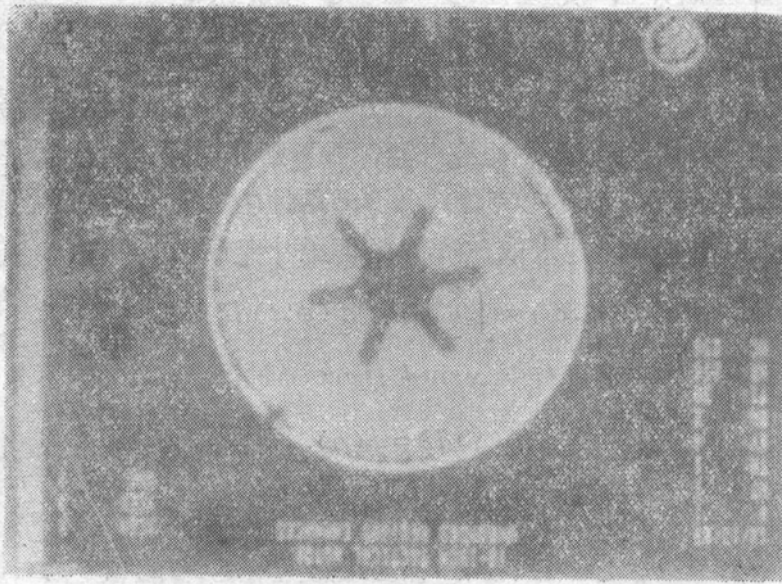


图1 Φ360发动机断层图象

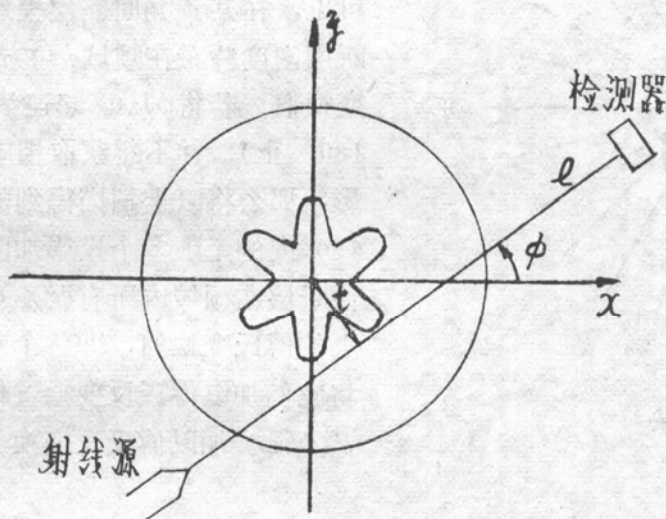


图2 射线沿直线横穿断层

$\mu(x, y)$ —— (x, y) 处线衰减系数,

$D(x, y)$ —— (x, y) 处密度值,

k ——某能量射线下 μ 和 D 间转换常数。

(1)式两边取对数并表示为相对值,得相对透射

$$p(y) = \ln I_0 / I_1 = \int_L k D(x, y) dx \quad (2)$$

检测器接收量说明了射线穿越断层途径上各点密度值的综合衰减作用,提供了该途径上密度分布的信息量。如射线沿平面内和 x 方向成 ϕ 角的某直线 l 穿越断面,该直线方程为:

$$x \sin \phi - y \cos \phi - t = 0 \quad (3)$$

式中 t ——原点到直线的距离。

$$\text{则输出量 } p(\phi, t) = \int_R kD(x, y) \delta(x \sin \phi - y \cos \phi - t) dx dy \quad (4)$$

式中 R ——包括断面在内的一个区域, 断面外 $D(x, y) = 0$ 。

$\delta(\dots)$ —— δ 函数。乘以 $\delta(\dots)$, 限制积分只沿(3)式描述的直线进行。

设 ϕ 为某一定值。在平面内从断面某一边缘开始, 并不断改变 t , 射线逐次沿无限条平行直线 l (覆盖整个断面) 穿越断面后得到的 $p(\phi, t)$, 即为 ϕ 角时在射线照射下断层的一维投影, 它包含断层密度分布的一定信息量。现求取 $p(\phi, t)$ 的傅里叶变换

$$P(\phi, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} p(\phi, t) dt \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式并注意只有 $t = x \sin \phi - y \cos \phi$ 时 $P(\phi, \omega)$ 才能不为 0, 及

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \delta(\xi) d\xi = f(0), \text{ 得:}$$

$$P(\phi, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} kD(x, y) e^{-j\omega(x \sin \phi - y \cos \phi)} dx dy \quad (6)$$

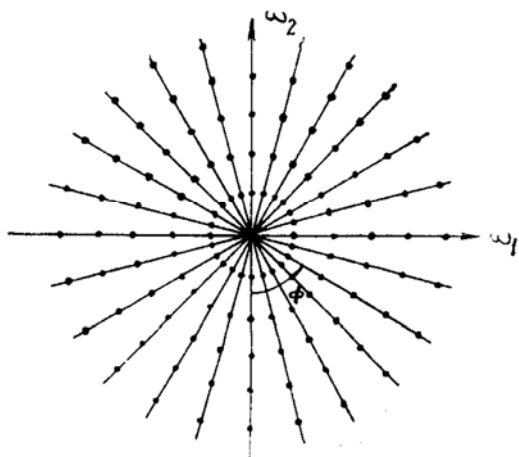


图3 频域

这正是 $kD(x, y)$ 的频率为 $+\omega \sin \phi$ 和 $-\omega \cos \phi$ 的傅氏变换, 即 $k \cdot D(x, y)$ 在两维频域 (傅里叶域, 见图3) ϕ 角方向各频率时的傅氏变换值。可见, 在某 ϕ 角时断层投影的傅氏变换等于该断层密度分布在频域 ϕ 角方向各频率时的傅氏变换值。若将 ϕ 从 0° 起连续增加一极小量 (至 180° 止), 并不断获取相应 ϕ 角时断层的新投影, 那么将以上扫描得到的该断层在 $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ 内的无限多个投影加以傅氏变换, 便得到该断层在频域内所有 ϕ 角 ($0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$) 方向上的傅氏变换值, 即整个断层的傅氏变换值。将它们加以傅氏反变换, 便是原断层图象。对 $P(\phi, \omega)$ 加以傅氏反变换并转换为极坐标系,

再建出断层图象

$$kD(x, y) = 1/4\pi^2 \int_0^\pi d\phi \int_{-\infty}^{\infty} P(\phi, \omega) e^{j\omega(x \sin \phi - y \cos \phi)} |\omega| d\omega \quad (7)$$

其中 $|\omega|$ 是函数 $x = x(\omega, \phi)$, $y = y(\omega, \phi)$ 的雅可比式。

实际上, ϕ 和 t 是不断取有限小等增量, 在 $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ 范围内足够多 ϕ 角位置上分别用足够多条射线穿透断层来均匀地采集相对完整的数据, 然后将得到的足够多个断层投影进行傅氏变换, 得出断层在频域内足够多个 ϕ 角位置的傅氏变换值, 并由此进行反变换去足够精确地再建出原断层图象。图3中“·”是表示断层投影的离散傅氏变换值的点。

由上得出, 经过第一步“数据采集步骤”, 通过扫描采得大量原始数据; 然后经第二步“图象再建步骤”, 循法加工计算原始数据; 完全能够建立该断层密度分布图象。有多种方法说明断层图象生成原理, 也有多种图象再建方法。上述为“傅里叶变换法”, 其示意图如图4。由于可采用快速傅氏变换(FFT)法, 该法再建图象速度较快, 是常用的一种。

由(7)式不难导出另一常用图象再建法——“卷积法”, 如图5。该法先将扫描得到的投影信号取对数, 然后以某种方式对结果信号施以卷积运算(滤波), 输出“修正后信号”, 进而

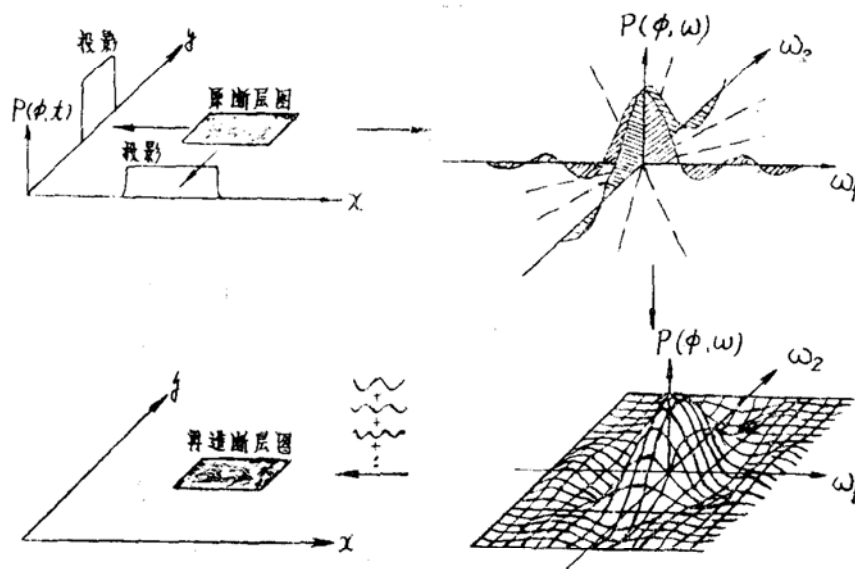


图4 傅里叶变换法再建图象

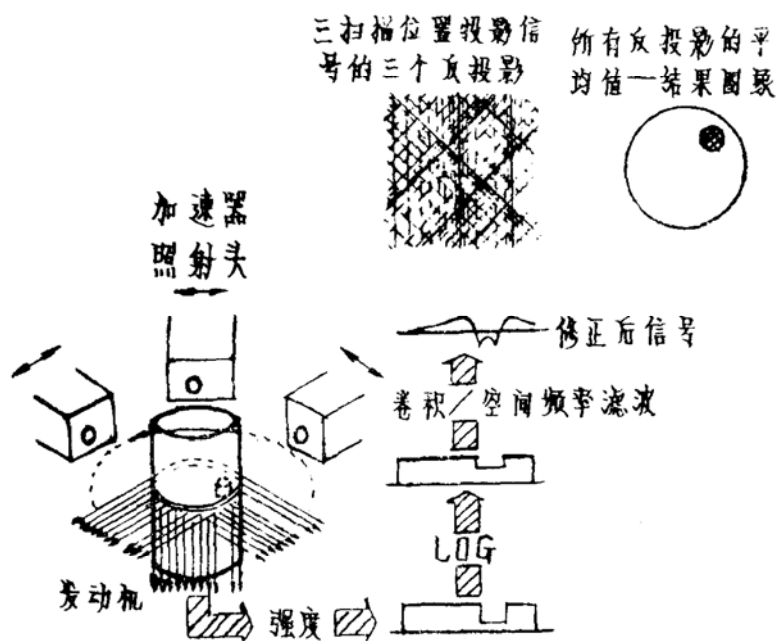


图5 卷积法再建断层图象

求出其反投影（图中表示了三个扫描位置投影信号的三个反投影，图示信号的反投影即图中浓密和信号幅值成比例的竖直条纹），最后将所有反投影进行平均运算并取半，便再建出原断层图。

2. 系统组成

图6为大型固体发动机工业CT系统的组成示意图（用其中一个检测器示意）。射线由直线电子加速器发出，经过准直仪成薄（或细）射束，穿透发动机断层后经准直仪得细射束衰减信号，由检测器接收。产生的电子信号经模数变换器(AD)成为数字信号，并以接收的源

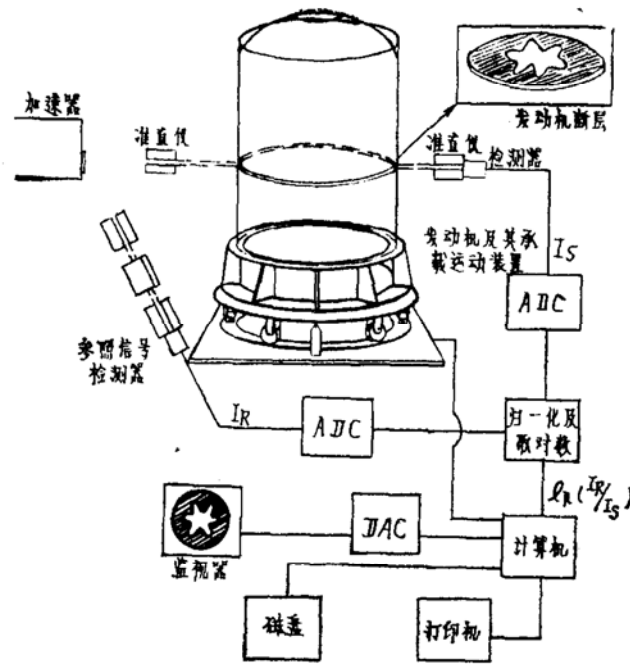


图6 固体发动机工业CT系统组成

射线束数字信号为基准进行归一化。其对数信号输至计算机。计算机控制承载发动机的装置作必要的步进式平动和绕发动机轴线步进式旋转，同时不断采集新位置时的一批数据。计算机处理和计算该断层的大量投影数据，再建出断层图象。还可进一步处理和增强断层图象。象信号可由打印机打印、磁盘存储，也可经数模变换器(DAC)输至监视器显示模拟图象。

计算机系统是整个系统的中心部分，是保证断层图象重建速度和质量之关键。CT用计算机系统一般都具有阵列处理器。有的采用“软件固化”技术，藉以提高图象重建速度。为存储和处理大量象素数据，计算机系统应有较大内存。

根据用途，使用加速器、较高能量x光管或同位素源（其射线常称为γ射线）等射线源。要求产生的射线能量合适、能谱好、剂量率足够高且稳定、场对称性及平整度符合要求等。

要求射线检测器（系统关键部件之一）量子检测效率高、响应时间短、线性好、工作稳定；鉴于发动机粗大，需用射线能量高、剂量率大，检测器必须适应高能量工作条件，动态范围要大。为求高图象鉴别率，体积要小。目前，多采用闪烁晶体检测器。

移动发动机进行扫描的扫描运动机械，直接影响数据采集速度和重建图象质量。要求它动作灵活、迅速、精确，高适应性。其运动方式和移动对象根据要求设定。

3AF/ACT-1系统简例

世界首台固体发动机工业CT装置AF/ACT-I，用来检测直径一米以内发动机。射线源为420KVx光机（按设计也使用1~4 MeV加速器）。射线经准直仪后成薄扇形射束。CT扫描主要采取移动发动机方式。美Eimeldigen公司生产的巨大精密机械平台（可承载2.5吨重、2.5米长发动机）在扫描时载着发动机平动和转动。一般完成一次扫描要转动近800个角度位置。另一机械在垂直方向同步地移动射线源和检测器。机械转动精度15弧度秒，平动及垂直移动精度40μm。采用闪烁晶体加光电二极管式检测器，160个排列成弧形，彼此间隔（中间充铅）5 mm。检测器正面尺寸厚×宽=10mm×8mm，检测器孔径0.5~4mm（由计算机控制），

断层实际厚度1mm~10mm (由计算机控制)。检测器间隔用来防止相邻两路射线串扰,平动是为了密密对断层进行射线扫描。系统采用Data General公司计算机,带有一个不小的阵列处理器。该机采用卷积法再建图象,图象再建软件较医用机更为先进和灵活。有专门固件来帮助完成图象再建。按设计指标,计算机再建一幅图象时间低于30秒。由于受探发动机内无运动部分,且容许较高照射剂量,较长时间扫描和照射对生成图象有益无害,对发动机无不良影响,因此该机生成一幅图象需5~10分钟。该机再建断层图象像素数常为 1024×1024 ,也可 2048×2048 。

三、固体发动机工业CT系统探伤性能 评述及系统优缺点

1. 系统检测鉴别率

系统检测固体发动机时,使用空间鉴别率来说明它分辨高对比度,小尺寸缺陷的能力。它取决于像素大小、孔径函数、数据取样频率、图象再建算法精度及扫描运动机械精度等因素。还用对比度鉴别率表征系统分辨发动机内部密度和母体相近部分或缺陷(尺寸可较大)的能力。使用目前一般水平的ADC,系统对比度鉴别率可达0.03%(即可检测发动机内0.03%密度变化部分)。实验表明,AF/ACT-I可探测 $\phi 360\text{mm}$ 发动机中 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 体积的0.1%密度差的区域,AS&E的系统能探测 $\phi 1.9\text{米}$ FP-270发动机中 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 5\text{mm}$ 体积的5%密度差的小区域(变差: $2^{1/2}\sigma$)。

图7和图8分别给出AF/ACT-I和AF/ACT-II系统的“对比度细节曲线”(设计值),这些曲线给出这两种发动机工业CT系统检测某些固体发动机或材料的空间鉴别能力,以及鉴别这些发动机或材料中较大面积的低对比度缺陷的能力。

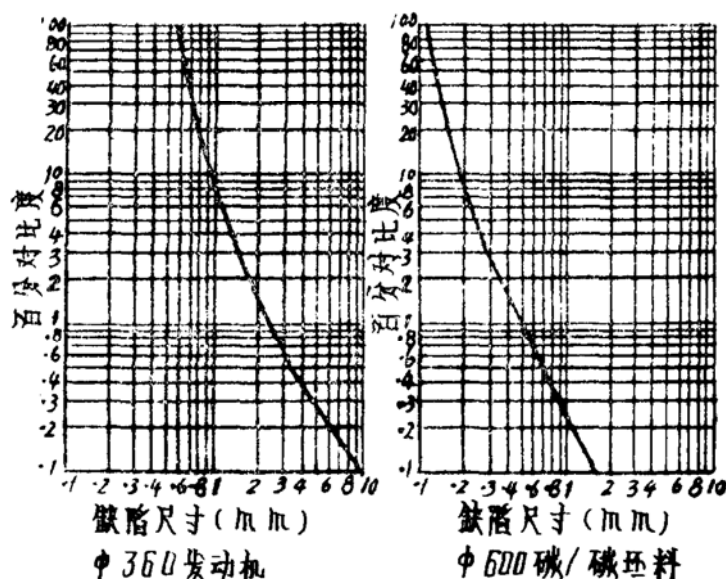


图7 AF/ACT-I系统对比度细节曲线

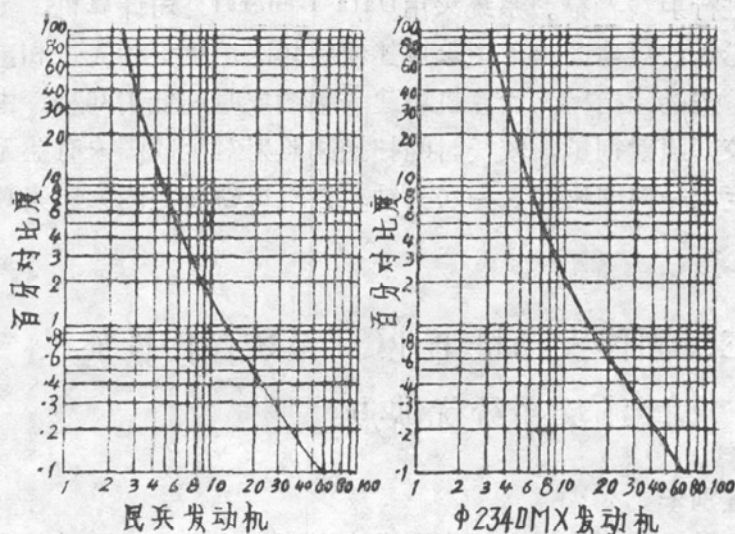


图8 AF/ACT-Ⅱ系统对比度细节曲线

2. 系统检测发动机缺陷能力

发动机工业CT系统的高空间鉴别率,决定了它检测发动机脱粘、药柱内部裂纹、气孔、疏松等缺陷的优良性能。AS&E系统检验 $\phi 1900$ FP-270发动机结果说明,可探出 0.08mm 厚的脱粘和层间分离,以及 0.08mm 宽的裂纹;它们的长度为两个象素长度(4mm)时,便能看得很清楚。图9是检测图象,模拟裂纹、层离和脱粘的细缝,即使宽仅 0.08mm ,仍然清晰可见。照相底片法和实时显象法也可检测到同数量级宽(或厚)的裂纹、脱粘和层离,甚至更高些,但只是在最佳情况下得到的。CT系统在一般情况下便可得到。如增加象素数目,性能还可能提高。另外,系统测出的裂纹长度、脱粘和层离面积要比底片法和实时显象法小得多。

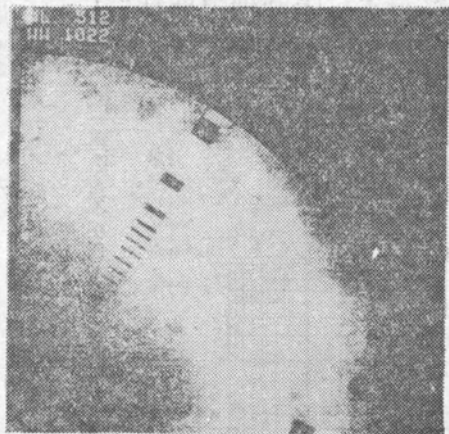


图9 $\phi 1900$ 假药发动机内部人工细缝检测图

AF/ACT-Ⅱ发动机工业CT系统,在探测 $\phi 2340\text{MX}$ 第二级发动机时,采用 1024×1024 个象素,预计可探测 $\phi 3.0$ 或更小的气孔。常规射线成象时,若灵敏度为 1% ,则只能探出 $\phi 23.4$ 的气孔。AF/ACT-Ⅰ系统在探测 $\phi 600$ 碳/碳坯件时,可以探出 $\phi 1.2$ 的小孔,常规射线成象时,若灵敏度为 1% ,只能探出 $\phi 6$ 的小孔。以上系统探测气孔结果,均可从图8和图7的相应曲线中观察到。

系统检测固体发动机的对比度鉴别率很高,保证系统易于检测发动机药柱内和母体密度差较小的缺陷。如系统可以检测MX第二级 $\phi 2340$ 发动机中 $6.5 \times 6.5 \times 6.5\text{mm}^3$ 体积的 6% 密度差的夹渣,采用普通射线法,设灵敏度为 0.75% ,即使可以检测,该夹渣区域也必须伸延近 30 厘米长。系统还可以探测发动机装药过程中可能造成的推进剂药柱的一些微小变异及发

系统检测固体发动机的对比度鉴别率很高,保证系统易于检测发动机药柱内和母体密度差较小的缺陷。如系统可以检测MX第二级 $\phi 2340$ 发动机中 $6.5 \times 6.5 \times 6.5\text{mm}^3$ 体积的 6% 密度差的夹渣,采用普通射线法,设灵敏度为 0.75% ,即使可以检测,该夹渣区域也必须伸延近 30 厘米长。系统还可以探测发动机装药过程中可能造成的推进剂药柱的一些微小变异及发

动机老化情况。

发动机浇药时，有时在推进剂内一些界面附近产生的“垂向流线”部分固体颗粒更为密实（这些部分推进剂机械性能、燃速等呈各向异性）。这些部分和母体密度差可望由系统检测出来。

在应力作用下，复合推进剂固体颗粒附近形成微小空泡，造成推进剂微小膨胀。通过观察这种膨胀，可以了解推进剂装药的机械性能变化率。微小空泡的存在，会在推进剂中产生大批低对比度区域，可由系统加以检测。

另外，在浇铸某些推进剂时，有的部分可能产生微小疏松。该部分推进剂吸收系数可改变 $0.1\% \sim 1\%$ ，完全在系统检测范围之内。

在固体发动机内部，一些组分不断迁移和相互作用，一些组分自身不断变化（如在温度影响下的降解作用），导致发动机老化。长期以来，没有合适的无损检测手段来检测整体发动机内部药柱老化情况。老化动力学数据指出，由于老化，部分推进剂密度相对母体密度产生 $0.01\% \sim 0.1\%$ 的变化。固体发动机工业CT系统可以检测到发动机老化现象。

玻璃纤维、碳/碳纤维等纤维缠绕成的发动机部件，有时出现浸胶不均、缺线束、断束、夹渣、线束对绞、折叠、起皱，结构不规整、小孔、层离等缺陷。其中多种是低对比度缺陷。发动机工业CT系统可以较好地加以检测。图10示出AF/ACT-I检测某 $\phi 600$ 碳/碳复合材料所得断层图象。图中坯件大片较暗部件是浸胶较少区域。

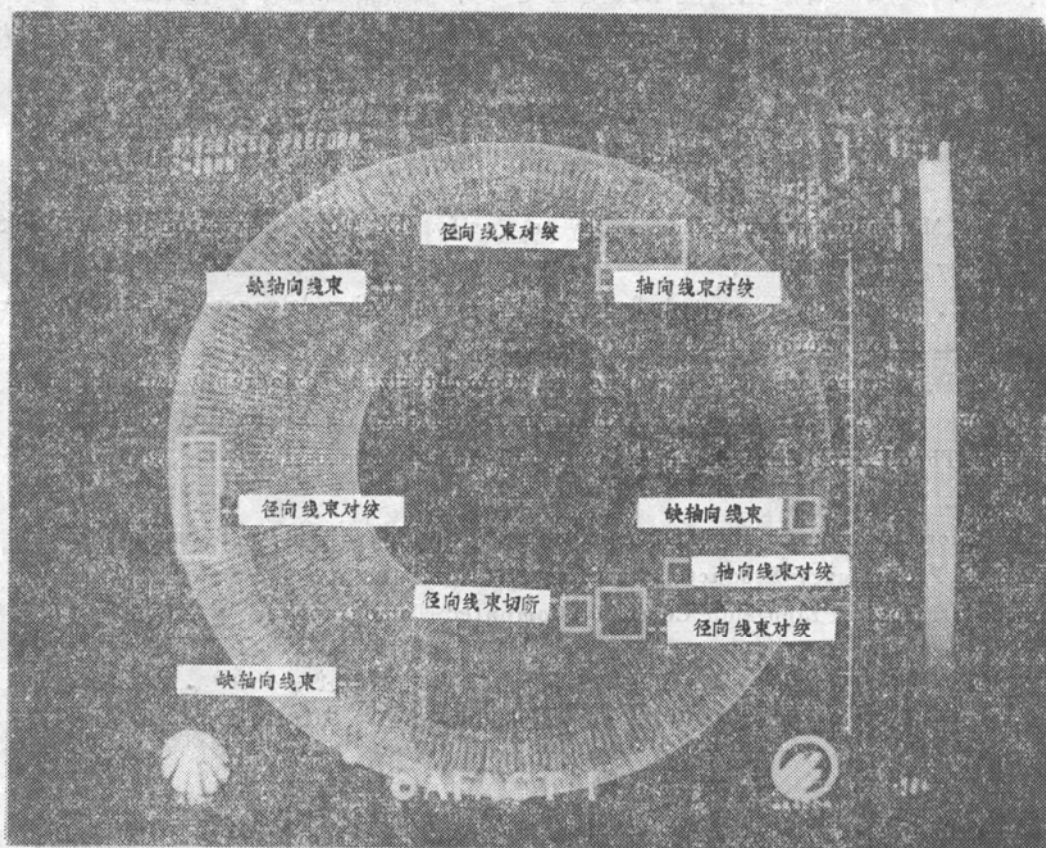


图10 $\phi 600$ 碳/碳复合材料坯件断层图

3. 系统优缺点

系统提供的信息量比普通x射线照相或实时显相高千倍。因此,数据更加完整、详细和精确。断层图象直观,具有高的空间鉴别率和极高对比度鉴别率,系统检测发动机各类缺陷的能力,是普通射线法难以或不能比拟的。

用来探测固体发动机的工业CT系统价格还较高,一次投资较实时显相法特别是射线底片法高许多。但该系统不消耗底片是一大节约。

发动机工业CT系统中,被探发动机前后设有准直仪,从而射线源靶点尺寸可能造成的半影(探测图象几何不清晰度来源)大大减小;来自周围的散射线(会使图象模糊)遭到遮挡。且检测器接收穿透发动机后的纤细x射线束,发动机内部散射线的影(影响图象清晰度)也大幅降低。极大程度上消除了传统x射线检测法难以或不能克服的上述图象不清晰因素,为得到高质量断层探测图象提供了条件。

四、发动机工业CT系统近期动向

首台固体发动机工业CT机于1982年建成。尽管耗资大、困难多,由于固体发动机工业CT系统独特的优良探伤性能,美空军、航空喷气公司和ARACOR等完成AF/ACT-I后,又于1984年研制了第二型机器AF/ACT-II,用来探测MX第二级发动机。在图象生成速度、探测能力方面有很大提高。还准备研制性能有新飞跃的下一代型号。

固体发动机工业CT系统正在继续发展中,围绕着提高机器性能,主要是提高空间鉴别率和探伤精度,以及加快断层扫描图象产生速度;并为降低系统成本,正进行多方努力。先进的CT装置“动态三维图象重建装置”(DSR)的有关技术,可能会应用到固体发动机工业CT系统中来。

参 考 文 献

- (1) Benjamin, M. Elson, Computerized X-ray to Verify MX Motors, Aviation Week & Space Technology, April 16, 1984.
- (2) Peck, H. E., Advanced Computed Tomography — a Major Advance in Solid Propellant Motor Evaluation, Aerojet Technology, 1984.
- (3) Burstein, P., Mastronadi R. & Kirchner, T., Computerized Tomography Inspection of Trident Rocket Motors, a Capability Demonstration, Materials Evaluation, Nov. 1982.
- (4) Pavlidis, Theo, Algorithms for Graphics and Image Processing, 1982, Computer Science Press, Inc.
- (5) Euclid Seeram, R. T., Computed Tomography Technology, 1982, W. B. Saunders CO.
- (6) ARACOR, Preliminary Product Data Sheet, 15 Nov., 1983.
- (7) Aerojet Strategic Propulsion Company, Computed Tomography.

INDUSTRIAL CT INSPECTING SYSTEM FOR SOLID ROCKET MOTOR

Guo Changyun

Abstract

Owing to limitations of X-ray film method and X-ray real-time imaging method in inspection of solid rocket motor, this paper introduces the industrial CT system for solid rocket motor evaluation which has excellent NDE performance. The principle for the system to produce the density distribution image of a thin motor slice, the popular imaging reconstruction methods and the basic formation and essential parts of the system are deduced and elucidated briefly. Comments of the system on performance to inspect motors and ability to find various defects of the motor as well as the discussion of system merits and demerits are given. In addition, the paper describes in short length the general developing survey, characteristic and recent tendency of the industrial CT system for solid rocket motor evaluation.

Keywords: X-ray inspection, Solid rocket engine

STATIC ERROR ANALYSIS AND ADJUSTMENT OF SIX-COMPONENT FORCE TEST STAND

Gan Shanxian

Abstract

By using the method of maximum error, the paper deals with the analysis of the static error of the six-component force test stand of solid rocket motors. The results show that its static error is mainly from the adjustment of the vertical axis of the adjustable support. The formulas for calculating the static errors of the thrust misalignment moment and up are derived. The adjusting method of diminishing the static error of the vertical test stand is also discussed in the paper.

Keywords: Solid rocket engine, Test stand, Error analysis, Static error