

固体火箭发动机专用 ICT 机械扫描系统^{*}

杨兴根 陈宇杰

(海军航空工程学院, 烟台, 264001)

摘 要: 以成熟的组合精密镗床为本体, 研制了固体发动机专用 ICT 机械扫描系统。采用 450 kV X 射线源, 设计了准直器系统、探测器系统、机械扫描系统 (传动控制系统、夹具及同步台), 实测证明扫描系统符合精度要求。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 镗床, 计算机层析摄影, 机械扫描, 探测器, 准直系统

分类号: V 435. 1

ICT SCAN SYSTEM FOR SOLID ROCKET MOTORS

Yang Xinggen Chen Yujie

(Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai, 264001)

Abstract: Introduced the development of solid rocket motors' special ICT based on mature combined boring mill. Demonstrated the feasibility of using X-ray tube, whose voltage was 450 kV. The collimator system acquisition sensor system and scan system transmission-control system, gisp and synchronous rack were designed.

Subject terms: Solid propellant rocket engine, Boring machine, Computerized tomography, Mechanical scanning, Detector, Colimated light system

1 引 言

固体火箭发动机在高温、高压、高速、高负载的条件下工作, 缺陷的存在会降低安全可靠性, 甚至导致恶性事故。针对固体发动机特殊的检测要求 (要求检测复合结构分层和脱粘情况, 复合药柱内部气孔、夹渣、裂缝情况) 及自身的形体特征, 优选 ICT (Industry Computed Tomography) 技术是合适的。ICT 具有独特的优越性: (1) 非接触式检测方法, 受被检试件的材料种类、外形、表面状况限制较少。(2) 检测结果是反映某断面的密度变化的截面图, 可直观得到目标细节的空间位置、形状、大小, 易于识别和理解。(3) 图像清晰, 检测动态范围高 (4) 图像数字化, 便于记录、分析、传输和存储。

2 ICT 系统的组成及功用

ICT 通常由射线源、机械扫描系统、探测器系统、计算机系统、屏蔽设施等部分组成。射线源提供 CT 扫描成象的能量线束, 以穿透试件, 根据射线在试件内的衰减情况实现以各点的衰减系数表征的 CT 图像重建。射线准直器限制射线穿透待测件扇面的宽度及探测器接收信

* 收稿日期: 1998-11-11, 修回日期: 1999-01-04

号的孔径。探测器系统用来接收穿过试件的射线信号,经放大和模数转换后送入计算机进行图像重建。机械扫描系统实现 CT 扫描时试件的旋转或平移以及射线源-物体-探测器之间物理位置的调整。计算机系统进行扫描过程控制、参数调整、图像重建、显示、处理等,包括软硬件两部分。射线源-机械扫描系统-探测器系统的组合决定了 CT 系统可能获得的信息质量。

3 ICT 的关键部件设计及扫描方案

射线源的主要性能包括射线能量、射线强度、输出稳定性等。目前 X 射线管的能量最高可达 450 kV, 大致可穿透 100 mm 的钢及 350 mm 的铝件。对于现役导弹用的固体发动机的截面形状和尺寸, 绝大部分都是可以穿透的, 个别带凸耳截面不能穿透, 但只要能获得其余部分的数据, 就可以对凸耳处进行特殊扫描, 用软件补偿也可解决。

在比尔衰减定律中, 物质的线衰减系数 u 单位采用 cm^2/g 时, 各种材料的衰减系数相差很微, 可以用铁的衰减系数近似代替药的衰减系数进行计算。

待测固体发动机外壳厚 1 cm, 材料是铁, 故质量厚度

$$d_1 = 1 \text{ cm} \times 7.8 \text{ g/cm}^3 = 7.8 \text{ g/cm}^2$$

药的质量厚度

$$d_2 = 35 \text{ cm} \times 1.7 \text{ g/cm}^3 = 59.5 \text{ g/cm}^2$$

总的质量厚度

$$d = d_1 + d_2 = 67.3 \text{ g/cm}^2$$

在 300 kV 时查得的质量衰减系数为 $0.107 \text{ cm}^2/\text{g}$, 则

$$I_0/I_d = e^{ud} = e^{0.107 \times 67.3} \approx 1341$$

在 300 kV X 光管辐射量为 $0.1 \text{ mA} \cdot \text{min}$ 时, 探测器信号为 $15 \mu\text{A}/1341 \approx 10 \text{ nA}$ 。近似类推在 450 kV 的 X 光管辐射量为 $2 \text{ mA} \cdot \text{min}$ 时, 探测器信号为 200 nA, 相对于 1 nA 的噪声, 信噪比为 200, 这样的信噪比采集的数据已可以产生较好的图像。

经计算, 采用 450 kV 的 X 射线管是可行的, 从而避免使用体积大, 耗资多的加速器源。

采用闪烁体光电倍增管探测器 (32 个), 参照国际上相近的 ICT 机, 考虑应整除 180° , 选用小扇面夹角 10° 较合适。32 个闪烁体显然应布置在这 10° 小扇角决定的弧线上, 故从射线源焦点到探测器组的半径定为 917.5。光电倍增管与探测器间靠电缆传输。

采用被测件前后双准直器的方案, 前准直器限制入射扇面宽度, 决定切片厚度, 变化范围是 1 mm, 2 mm, 4 mm; 后准直器限制了探测器孔径宽度, 需形成 1 mm, 2 mm, 4 mm 三种横缝和 0.3 mm, 1 mm, 3 mm 三种竖缝。重建算法要求探测器组前的矩形窗口尺寸完全相同, 且相对各探测器的位置相同, 才能视各探测器无差别且机会均等的采集到有效数据。如果我们把后准直器设计成缝隙可调结构, 必须解决如下设计问题: (1) 每次调节横缝和竖缝时, 两边都必须调整, 保证缝隙位于探测器的有效探测位置。(2) 横缝较长, 前后需同步运动, 平行度要求严格。(3) 竖缝为多路, 各路需保证等宽。

可见, 若设计成可调结构会使系统十分复杂, 且不易保证精度, 故采用调换模板的方式来解决准直器的问题。由加工精度保证对探测器的定位精度, 通过调换模板来实现要求的横缝竖缝结合, 相对宽度误差可通过计算机补偿来清除。

机械扫描台必须完成以下任务: (1) 实现待测固发的定位及装夹; (2) 实现旋转、切片及扫描运动; (3) 安装射线源、探测器系统、准直器系统并控制其相对位置。

机械扫描台是 ICT 的基体, 要求它有高的运动和定位精度、变形小、载重大, 实际是一台精密机床。用成熟的机床进行某些小改进, 则可克服周期长、经费多、且变形大和可靠性差

的不足。经论证分析采用卧式镗床 (T618) 研制 ICT 是可行的。

(1) 床头箱垂直方向可动, 范围最大可达1 000 mm, 故主轴距床体上表面的最大距离约为1 200 mm, 提供了足够的空间来安排放置射线源、待测固体发动机及探测器。

(2) 床头主轴箱可用来实现旋转分度运动。

(3) 镗床本身的平移工作台可用来安放射线源及探测器系统, 并实现切片及平移运动。尾座距床头箱水平轨道长为2 140 mm, 移动台在此方向上宽700 mm (把原工作台在此方向上对称截掉共200 mm), 故移动台在此方向上最大可调距离约为1 440 mm, 而固体发动机要求检测的长度范围是1 200 mm, 故借用此方向的平移导轨即可保证在固体发动机的待检长度上均能切片。移动台在垂直于切片方向导轨的平移范围是800 mm, 而固体发动机最大外径440 mm, 故可保证固发径向扫描范围。

(4) 镗床尾座可对固体发动机起辅助支撑的作用, 与主轴箱的移动配合定位可提高固体发动机的定位精度, 减少旋转时的振动。

(5) 镗床是精加工机床, 且有较长的时效期, 变形小。机械装置精度高, 多方面性能参数能满足 ICT 系统对运动及定位的精度要求。

可见, 改型方案解决了传动措施及控制系统专用夹具及同步台的设计。

控制系统设计采用微机闭环伺服控制系统。在各种常用的执行电机中, 步进电机的控制在数字化系统中最易实现, 具有位置锁定功能, 且步进电机的角位移量与输入脉冲数严格成正比, 因此, 电机转动一转后没有累积误差, 具有良好的跟随性。尽管在负载较重或运行在极限频率附近时步进电机会产生丢步现象, 且丝杠导轨副间隙的存在会造成往返行程误差, 但可采用微机光栅绝对位置检测系统以实时控制并调整扫描工作台到准确位置。本系统在平移、切片方向分别采用800 mm、1 200 mm 的光栅尺。

专用夹具设计主要避免三爪卡盘直接夹紧引起发动机薄壳变形, 同时使发动机两端能置于射线束切片范围内。故利用固体发动机与弹体的连接螺栓孔设计夹具套, 夹具套另一端用三爪卡盘夹紧。

同步台设计。根据二代扫描方式要求, 每一分度射线源和探测器同步平移以采集足够的数据重建图像。重建算法要求探测器扇面与射线束扇面共面, 探测器组对称分布在射线束扇面中, 每步平移保证上述关系依然存在, 这就要求射线源及探测器平移的同步性好, 因此设计 C 型架同步台, 把射线源及探测器均放置在上面, 设计微调机构保证它们之间的相对位置, 驱动同步台即可使射线源和探测器同步运动。而且, 在前面已选定射线源及探测器, 它们与 C 型架综合的体积及重量均在镗床移动台的承重范围内。这种方法比射线源与探测器分别驱动的机械装置控制系统较简单, 易于保证精度。

经实测证明, 扫描台符合 ICT 运动精度要求。

参 考 文 献

- 1 Anon. Standard guide for computed tomography (CT) system selection. ASTM E1672-95
- 2 Anon. Standard guide for computed tomography (CT) imaging. ASTM E1441-93
- 3 李时光, 郭志平, 倪培军, 等. 工业 CT 技术. 无损检测, 1996, 18 (1) ~ (5)
- 4 Anon. Using CT and digital radiography systems to inspect rocket motors. Material Evaluation, 1994 (2)