

文章编号: 1000-8055(2007)07-1030-05

基于工业 CT 技术的设备故障诊断与维修

卢洪义¹, 徐 明², 于光辉², 孙建国³

- (1. 海军航空工程学院 飞行器工程系, 烟台 264001;
2. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 烟台 264001;
3. 海军航空工程学院 新装备培训中心, 烟台 264001)

摘 要: 采用先进的工业 CT 无损检测技术, 对精密设备内部结构进行无损定量检测, 根据得到的结构断层图像, 确定设备各部件之间装配关系和配合间隙, 比较完好设备的断层结构图像, 诊断出设备的故障部位, 提出故障修复方案。对于无故障精密设备, 利用工业 CT 无损检测具有的尺寸精密测量功能, 结合相应部位的断层结构图像, 识别内部转动部件的磨损程度或部件间产生的相对位移, 推断系统将来可能发生故障的运行阶段, 提出设备的维修计划。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 工业计算机断层 (CT); 故障诊断; 精密设备; 维修
中图分类号: V241.07 **文献标识码:** A

Fault diagnosis and maintenance of equipment based on industrial CT technology

LU Hong-yi¹, XU Ming², YU Guang-hui², SUN Jian-guo³

- (1. Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China;
2. Graduate Student Brigade, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China;
3. New Equipment Training Center, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: With advanced industrial computed tomography (CT) nondestructive testing (NDT) technology, rational NDT was made for inner structure of precise equipments. Every component's assembling relation and fit clearance was determined from the CT image. Then, intact equipment's CT images were compared, and the fault locations were diagnosed along with a repair scheme. For fault-free precise equipments, NDT with industrial CT provides precise measurement functions, enabling you to recognize inner-rotating parts' abrasion or relative displacement among components. And, a maintenance plan could be prepared by deducing the running stage with possible faults in the future.

Key words: aerospace propulsion system; industrial computed tomography (CT); fault diagnosis; precision equipment; maintenance

收稿日期: 2006-11-13; 修订日期: 2007-02-06

基金项目: 总装“十五”预研课题

作者简介: 卢洪义(1965), 男, 山东莱阳人, 副教授, 工学博士, 主要从事导弹、航空发动机测试、状态监控与故障诊断的研究。

随着电子工业和先进制造技术的发展, 设备的结构越来越复杂, 维修保障难度也越来越大. 高、精、尖武器装备的分解、拆卸会破坏原来的故障模式, 不能复现原来的故障现象. 这就要求采用新的无损检测技术, 如工业 CT 技术^[1]、正电子湮灭技术等, 通过非破坏式的无损伤检测方式, 诊断精密设备内部结构的故障或部件的损伤程度等. 在无损检测技术中, 已经有超声、声振、微波等无损检测技术以及测温技术、油液分析等技术在设备的故障诊断方面发挥着重要作用. 先进的工业 CT 技术自从诞生以来, 就以清晰、直观的图像方式, 并以独特的精确定量无损检测的功能显示出在无损检测方面的巨大应用空间. 基于工业 CT 技术的设备故障诊断与维修, 以断层图像的方式, 从结构细节的空间位置、形状、大小分析设备的技术状态, 诊断其故障的性质, 预测故障趋势, 发现故障征兆和原因, 确定必要的对策. 对于火工品, 如, 固体发动机内部点火器、电发火管、固体发动机内部结构等的故障诊断与失效预测, 工业 CT 技术无疑是最佳的测试手段, 具有很高的经济、军事和社会效益.

1 工业 CT 精密测量技术在设备故障诊断与维修中的应用

1.1 工业 CT 系统空间点精密测量分析^[2,3]

工业 CT 系统是精密测量仪器, 为了重建被测物体中的任意一点 $f(x, y)$ 的图像, 需要准确确定经过该点的所有投影射线, 其中各点关系如图 1 所示.

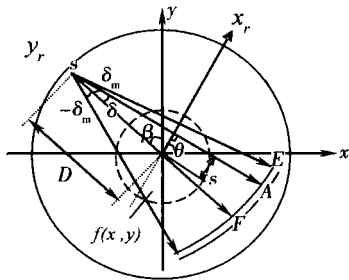


图 1 工业 CT 空间点的位置关系

Fig. 1 Industrial CT spatial point's ubiety

设 $R(\delta, \beta)$ 表示某一扇束投影, β 是中心射线与 y 轴夹角, δ 表示任一射线与中心射线的夹角. 对于任一射线的投影若用平行射线积分取得的话, 那么该积分值应该是平行投影 $g(s, \theta)$ 在图 1 中所标的 θ 和 s 位置上的投影值. 以 D 表示射线源 s 到坐标原点 o 的距离, 则有

$$\theta = \beta + \delta \text{ 和 } s = D \cdot \sin \delta \tag{1}$$

$f(x, y)$ 用极坐标关系 $f(r, \varphi)$ 来表示, 则利用极坐标关系, 及当 $|s| > s_m$ 时, $g(s, \theta) = 0$, 得到公式(2)

$$f(r, \varphi) = \frac{1}{2} \int_{-\delta}^{\delta} \int_{-\arcsin(s_m/D)}^{\arcsin(s_m/D)} g(D \sin \delta \beta + \delta) \cdot H[r \cos(\beta + \delta - \varphi) - D \sin \delta] \cdot D \cos \delta d\delta d\beta \tag{2}$$

公式(2)中 β 的积分限为 $-\delta \sim 2\pi - \delta$ 覆盖了 360° 范围, 考虑以 β 为变量的函数都是周期为 2π 的函数, 所有积分限改成 $0 \sim 2\pi$.

为了准确定位 X 射线穿过被测对象的每一点位置, 采用光栅尺定位, 计量光栅的技术基础是莫尔条纹. 莫尔条纹的特点如下: 莫尔条纹利用光的干涉现象, 具有放大作用.

以 W 表示莫尔条纹的间距, $\bar{\omega}$ 表示光栅栅距, θ 表示两光栅纹线间夹角, 当 θ 很小时

$$W \approx \frac{\bar{\omega}}{\theta} \tag{3}$$

从上式可知, 当 $\bar{\omega}$ 一定时, θ 越小 W 越大, 这相当于把栅距放大 $\frac{1}{\theta}$ 倍, 提高了测量灵敏度.

莫尔条纹由光栅的大量刻线共同形成, 对线纹的刻划误差有平均抵消的作用, 能在很大程度上消除短周期刻划误差的影响, 提高了测量精度.

1.2 运动部件间间隙测量

采用 1.1 工业 CT 无损检测尺寸测量方法, 精确测量运动部件间的间隙或部件间的相对位移. 以航空涡喷发动机为例, 采用工业 CT 技术测量无冠叶片的径向间隙; 篦齿封严的轴向和径向间隙; 转子与静子之间的轴向间隙; 由于机械和热应力引起的部件变形等, 如图 2 和图 3 所示. 使用工业 CT 图像重建检测和尺寸测量, 不仅可以使我们清晰地观察到内部断层结构, 还可以将部件的尺寸、配合间隙精确测量出来, 为设备的故障诊断提供了准确的信息.

1.3 设备结构故障诊断与维修^[4]

1.3.1 故障判断

通过工业 CT 扫描检测得到图 2 和图 3 所示断层图像结构和尺寸数据, 根据设计资料诊断系统是否存在故障. 由于工业 CT 扫描检测得到的图像是数字图像, 因此可以结合故障诊断专家系统, 自动诊断系统是否存在故障, 起到故障诊断的辅助作用.

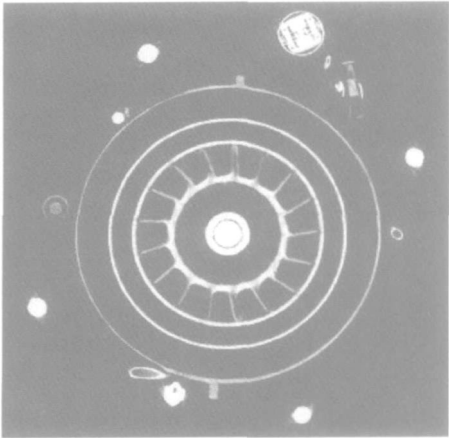


图 2 涡喷发动机工业 CT 叶片间隙图像
Fig. 2 Vane clearance measurement of turbojet engine measured by industrial CT

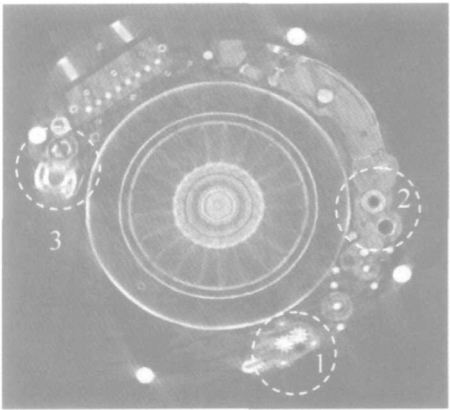


图 4 发动机某时刻的工业 CT 图像
Fig. 4 Industrial CT image of engine sometime

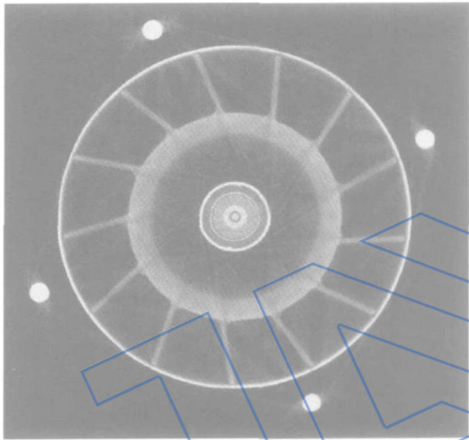


图 3 涡喷发动机工业 CT 轴间尺寸图像
Fig. 3 Axial clearance measurement of turbojet engine measured by industrial CT

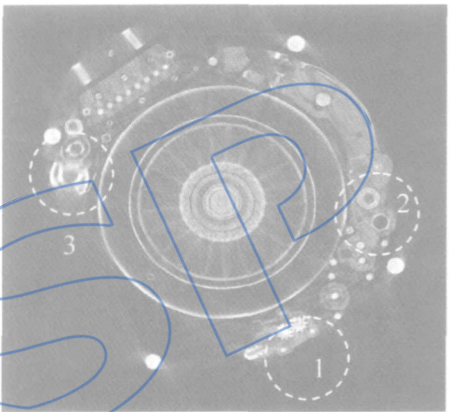


图 5 一年前后的工业 CT 图像
Fig. 5 Industrial CT image of engine one year later

1. 3. 2 故障预测

定期对设备进行工业 CT 无损检测, 比较不同阶段的断层结构图像, 判断结构磨损的速度, 评估设备的剩余寿命, 预测未来故障发生的可能阶段. 例如, 对某涡喷发动机进行工业 CT 检测, 如图 4 和图 5 所示. 图 5 工业 CT 图像是在间隔时间为一年情况下检测到的断层结构图像. 对使用一年前、后的涡喷发动机进行工业 CT 内部结构图像重建^[5], 然后对两副图片进行对比, 发现齿轮泵(图 5 中 1)、油路(图 5 中 2)明显出现差异.

对于出现可疑故障部位, 在后来的发动机质量监控, 应缩短检查时间, 并采用综合检测分析的方法, 对可能发生的故障做出预测, 并采取相应的对策.

1. 3. 3 故障修复

当设备出现故障进行修复时, 首先要确定故障的部位. 盲目的拆卸会破坏原来的故障状态, 采用断层图像重建检测方法, 从结构图像确定故障部位, 制定维修方案.

2 工业 CT 无损检测在火工品设备故障诊断与维修中的应用^[6]

由于火工品属于危险品, 其内部故障判断较为困难. 通常情况下, 采用专用火工品测试仪器, 如电雷管测试仪等, 来测量点火电阻值. 由于火工品对电较为敏感, 即使对其施加很少的测试能量, 操作不当, 也会引起事故. 目前导弹装备的大量使用, 固体发动机一般作为其动力装置和助推系统. 固体发动机经过一断时间储存后, 内部会产生脱粘、裂纹等缺陷, 这些缺陷严重威胁固体发动机的安全使用. 利用工业 CT 技术对火工品进行内部结构检测, 不需要对其施加作用能量, 从其断层图像来判断其是否存在缺陷或故障. 图 6 和图 7 分

别是在电发火管和在固体发动机故障诊断重建图像中发现的 0.2 mm 裂纹缺陷。

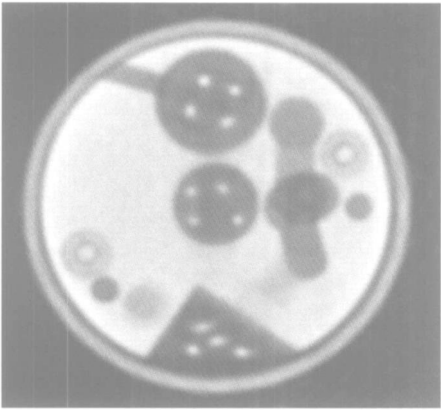


图 6 电发火管工业 CT 故障诊断图
Fig.6 Industrial CT fault diagnosis image of electric igniter squib electric detonator

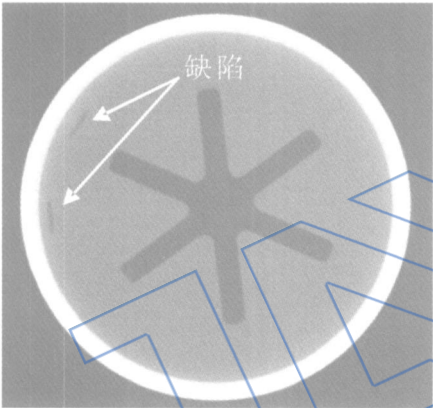


图 7 某固体发动机工业 CT 故障诊断图
Fig.7 Industrial CT fault diagnosis image of some solid engine

3 工业 CT 三维重建图像的故障诊断^[7]

工业 CT 三维重建指的是利用面阵探测器, 在样品按一定的扫描方式运动的过程中一次获得面阵投影数据, 再根据一定的算法直接重建出多个切片的 CT 图像或者说得到被检测样品的三维体数据, 得到三维检测图像。由于工业 CT 三维重建图像实际上对设备内部结构进行了数字化, 因此可以按照一定的算法对设备进行任意的分割, 从而发现内部结构缺陷的分布和走向, 更有利于设备的故障预测和维护。

扇形束图像重建算法

Feldkamp 由 Radon 变换推导出二维的扇束重建公式, 该公式如下:

$$f(r, \phi) = \frac{1}{4\pi^2} \oint d\Phi \frac{d^2}{[d + r \cdot \cos(\phi - \Phi)]^2} \int_0^\infty \omega d\omega \int_{-\infty}^\infty dY \frac{d}{\sqrt{d^2 + Y^2}} P_\Phi(Y) \exp\left[i\omega \left(\frac{dr \sin(\phi - \Phi)}{d + r \cos(\phi - \Phi)} - Y\right)\right] \quad (4)$$

如果考虑到探测器单元间距是有一定长度的, 空间频率就是有限的, 可以将上式作变量置换后改写为

$$f(r, \phi) = \frac{1}{4\pi^2} \oint d\Phi \frac{d^2}{[d + r \cdot \cos(\phi - \Phi)]^2} \times P_\Phi[Y(r, \phi)] \quad (5)$$

其中

$$Y(r, \phi) = dr \cdot \sin(\phi - \Phi) / [d + r \cos(\phi - \Phi)] \quad (6)$$

$$P_\Phi(Y) = \int_{-\infty}^\infty dY' \frac{d}{(d^2 + Y'^2)^{1/2}} P_\Phi(Y') g(Y - Y') \quad (7)$$

$$g(Y) = \int_0^{\omega_0} \exp(i\omega Y) \omega d\omega \quad (8)$$

其中 ω_0 表示采样的截止频率。

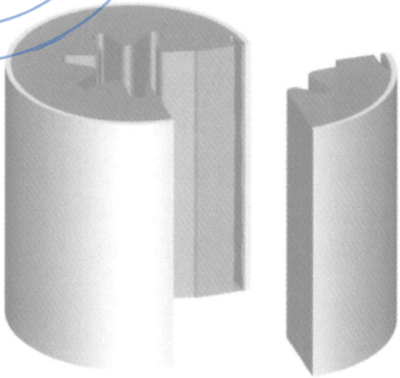


图 8 固体发动机三维 CT 图像
Fig. 8 Three dimensional industrial CT fault diagnosis image of solid engine

根据上述算法, 采用 C++ 语言^[8]对发动机部件进行工业 CT 三维重建图像, 得到图 8 所示的图像。

4 结 论

基于工业 CT 技术的设备故障诊断与维修是一种基于内部结构断层图像的故障诊断方法, 适合于精密机械设备的故障诊断与维修。建立相应的图像识别的专家故障诊断系统和系统状态数字图像库, 形成计算机辅助故障诊断系统。综上所述

述,基于工业 CT 技术精密设备的故障诊断与维修基本过程如图 9 所示.

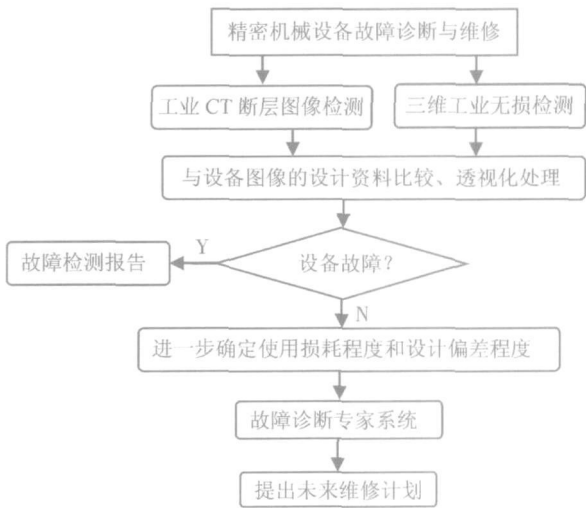


图 9 基于工业 CT 技术的设备故障诊断与维修
Fig.9 Equipment's fault diagnosis and maintenance
based on industrial CT technology

与其它基于数据信息的故障诊断方法相比,基于工业 CT 技术的故障诊断方法能比较直观、准确地发现可能存在的故障,预估系统状态发展趋势. 目前由于工业 CT 系统价格昂贵、使用数量较少,因此应用受到一定的限制. 但是随着大量高、精、尖武器装备和航空航天产品的使用以及工业 CT 检测成本的降低,基于工业 CT 技术的故障诊断方法将会得到广泛的应用.

参考文献:

[1] 赫尔曼 G T. 由投影重建图像 CT 的理论基础[M]. 严洪范, 译. 北京: 科学出版社, 1985.

[2] 卢洪义, 杨兴根, 孙有田. 固体火箭发动机内部缺陷高分辨率检测[J]. 推进技术, 2003(1): 90-95.

LU Hongyi, YANG Xinggen, SUN Youtian. High resolution inspecting investigation for inner defect of SRM [J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(1): 90-95.

[3] E1441-00 standard guide for computed tomography (CT) imaging[S]. ASTM , 1981.

[4] 卢洪义, 杨兴根, 孙建国, 等. 不完整投影数据情况下的图像重建[J]. 海军航空工程学院学报, 2002, 17(5): 301-303.

LU Hongyi, YANG Xinggen, SUN Jianguo. Image Reconstruction under incomplete projection[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2002, 17(5): 301-303.

[5] 陈虎, 王守尊, 周朝辉. 基于数学形态学的图像边缘检测方法研究[J]. 工程图学学报, 2004, 25(2): 112-115.

CHEN Hu, WANG Shouzun, ZHOU Chaohui. Research based on mathematics morphology image edge examination method[J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(2): 112-115.

[6] Rieder A, Schuster T. The approximate inverse in action with an application to computerized tomography [J]. SLAM J. Numer. Anal, 2000, 37: 1909-1929.

[7] 张爱东, 李炬, 陈发, 等. 工业 CT 图像的三维重建[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 26(4): 87-89.

ZHANG Aidong, LI Ju, CHEN Fa, et al. Three dimensional ICT reconstruction[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, 26(4): 87-89.

[8] 何斌, 马天予, 王运坚, 等编. Visual C+ + 数字图像处理 [M]. 北京: 人民邮电出版社 2001: 262-305.