

文章编号: 1000-8055(2009)01-0230-05

固体发动机 CT 检测中的一种缺陷识别方法

朱 敏, 卢洪义, 丛培胜, 李海燕
(海军航空工程学院, 山东烟台, 264001)

摘 要: 提出一种图像不变矩法和直方图分析法相结合的缺陷识别方法. 首先, 利用图像不变矩方法, 通过形状识别, 将裂缝从固体发动机缺陷中提取出来; 然后, 利用直方图分析法, 计算出气泡和夹渣像素值所在的灰度区间, 将气泡和夹渣区分. 从而实现固体发动机缺陷的自动分类识别, 解决了现有技术中通过人工判决缺陷而导致的识别效率低、准确性差的问题, 保证了固体发动机的性能.

关 键 词: 固体发动机; 计算机断层扫描成像技术(CT); 无损检测; 不变矩; 直方图分析; 缺陷识别
中图分类号: V435; V241.07 **文献标识码:** A

Method of defect recognition in solid motor CT testing

ZHU Min, LU Hong-yi, CONG Pei-sheng, LI Hai-yan
(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, 264001)

Abstract: In order to recognize the defects in the solid motor, a new method integrating image moment invariants method and histogram analysis method was put forward. Firstly, the cracks were distinguished from other defects by using image moment invariants method to recognize the shapes of defects. Secondly, histogram analysis method was used to calculate the gray intervals of bubbles and slag inclusions, and then distinguish them. So defects in solid motor were recognized automatically. The problems such as low recognition efficiency and low veracity induced by manual defect recognition are thus resolved and the capability of solid motor is ensured.

Key words: solid motor; computed tomography (CT); nondestructive testing; moment invariants; histogram analysis; defect recognition

固体发动机在运输和储存的过程中, 由于碰撞、颠簸、振动及湿热等因素的影响, 内部会出现各种缺陷, 这些缺陷可能影响固体发动机的整体性能, 甚至造成灾难性的事故. 工业 CT (计算机断层扫描成像技术) 作为一种先进的无损检测手段, 从 20 世纪 80 年代以来取得了迅速发展和广泛应用^[1]. 运用工业 CT 技术检测固体发动机的内部缺陷, 能发现许多常规无损检测方法难以检查出的问题, 大大提高了固体发动机的安全性能. 但目前工业 CT 检测出固体发动机内部缺陷完全

依靠检测人员手工判读, 降低了故障诊断的效率.

缺陷分类识别需要尽可能利用已有数据的信息, 可供使用的数据信息大致可以分为两类: 第一类是缺陷区域的形状信息, 即缺陷区域所包含的像素点的空间分布; 第二类是缺陷区域的外观信息, 即缺陷区域像素值的取值情况. 固体发动机中主要存在的三种缺陷是: 裂缝、气孔和夹渣. 在其 CT 检测断层图像中, 裂缝空间分布表现为狭长的椭圆形, 气孔和夹渣空间分布表现为近似圆形. 裂缝和气孔缺陷区域像素值取值处于同一灰度区

收稿日期: 2007-12-30; 修订日期: 2008-04-13

基金项目: 总装备部“十一五”预研课题项目(51328040107)

作者简介: 朱敏(1978-), 男, 安徽和县人, 讲师, 博士生, 主要从事信号处理、无损检测专业研究.

间,夹渣属于另一灰度区间.因此,可根据形状和外观信息对固体发动机缺陷实施分类识别.

图像不变矩方法通过提取灰度数字图像平移、旋转和比例不变性的数学特征,进行目标的形状识别.直方图分析法通过对灰度数字图像的像素分布统计,计算出图像的灰度区间,进行目标的外观判定.目前,图像不变矩法和直方图分析法已广泛应用于军事^[2-3]、工业^[4-6]、医学^[7]、生物^[8-9]等领域的目标和物体识别中.本文借鉴这些应用的成功之处,综合运用这两种方法,实现固体发动机缺陷的自动识别.

1 图像不变矩特征

图像不变矩是指图像经过平移、旋转以及比例变换后仍保持不变的矩特征量. Hu M K 于 1962 年在文献[10]中首次提出了连续函数矩的定义,并证明了有关矩的平移、旋转以及比例不变性等性质,并给出了利用二阶和三阶中心矩构造的 7 个矩不变量的表达式. Wong Y R 在文献[11]中,进一步给出了离散情况下的各阶矩的计算方法,但计算出的不变矩并不具有比例因子不变性.针对此,吕洪涛在文献[12]中通过对矩特征实施归一化处理,提出了一种新的不变矩算法,使其具有比例因子不变性,又能保持平移和旋转不变性.

图像函数 $f(x,y)$ 的 $(p+q)$ 阶普通矩和中心矩的公式如下

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x,y) dx dy \quad (1)$$

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x,y) dx dy \quad (2)$$

对于数字图像,积分用求和代替, m_{pq} 和 μ_{pq} 变为

$$m_{pq} = \sum_m^M \sum_n^N x^p y^q f(x,y) \quad (3)$$

$$\mu_{pq} = \sum_m^M \sum_n^N (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x,y) \quad (4)$$

其中 $p,q = 0,1,2, \dots$. $\bar{x}, \bar{y}$ 是数字图像的重心坐标.

$$\bar{x} = \left[\sum \sum x f(x,y) \right] / \left[\sum \sum f(x,y) \right] \quad (5)$$

$$\bar{y} = \left[\sum \sum y f(x,y) \right] / \left[\sum \sum f(x,y) \right] \quad (6)$$

归一化的中心矩定义为

$$\eta_{pq} = \mu_{pq} / \mu_{00} \quad (7)$$

其中 $r = (p+q)/2 + 1, p+q = 2,3, \dots$.

Hu M K 利用二阶和三阶中心矩构造了 7 个

不变矩,具体表达式见参考文献[10].

在文献[12]中,作者证明当图像进行比例变化时,修正的中心矩定义为

$$\eta_{pq}' = \rho^{p+q} \cdot \eta_{pq} \quad (8)$$

其中 ρ 是比例因子.

由于 7 个不变矩的变化范围很大.为了便于比较,可利用取对数的方法进行数据压缩;同时考虑到不变矩有可能出现负值的情况.因此实际采用的不变矩为

$$M_k = |\lg |\eta_k|| \quad k = 1,2, \dots,7 \quad (9)$$

2 直方图分析

直方图是一幅图像中各像素灰度值出现次数(或频数)的统计结果,它反映该图像中不同灰度值出现的次数(或频数),是图像的一种统计特征.

依据定义,在离散形式下,灰度直方图的计算如下^[13]

$$P_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad 0 \leq r_k \leq l, k = 0,1,2, \dots, l-1 \quad (10)$$

其中 n_k 为图像中出现 r_k 级灰度的像素数, n 是图像像素总数,而 n_k/n 即为频数, l 为图像的灰度级数,本文中图像为 8 位灰度图, l 取值为 256.

3 实验与分析

为了验证基于图像不变矩的缺陷识别方法的性能,构造一个含有典型缺陷的固体发动机模型,如图 1 所示.

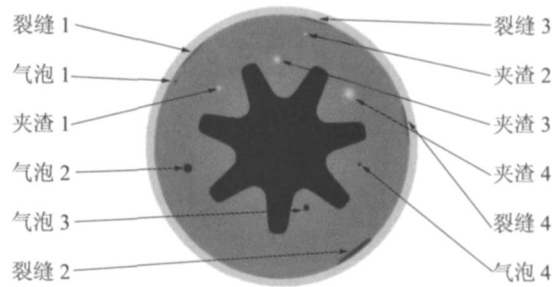


图 1 含有典型缺陷的固体发动机模型 CT 图像

Fig. 1 CT image of solid motor model which contains representative defects

模型中包含了 3 种常见类型的缺陷:裂缝、气泡和夹渣.构造的裂缝缺陷分布在模拟固体发动机壳体和药柱之间的 4 处不同位置,其大小基本相当,但旋转角度各不相同;气泡缺陷和夹渣缺陷分布在药柱内部,大小不同,由小到大按倍数依次

增长.

3.1 缺陷识别步骤

图像不变矩和直方图分析可以组合成固体发动机缺陷识别方法. 首先利用图像不变矩方法, 通过形状识别, 将裂缝从固体发动机 3 种缺陷中提取出来, 再利用直方图分析法, 计算出气泡和夹渣像素值所在的灰度区间, 将其区分开, 从而实现分类识别, 具体步骤如图 2 所示.

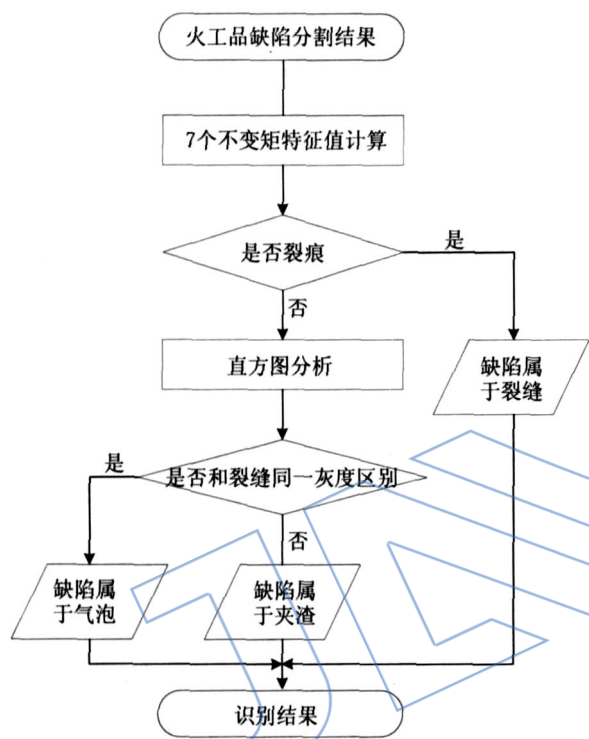


图 2 缺陷识别步骤
Fig. 2 Process of defect recognition

3.2 基于图像不变矩缺陷识别

采用图像分割算法提取出图 1 所示的缺陷后, 利用 Matlab 编程计算各缺陷的不变矩特征值 $M_1 \sim M_7$, 计算结果如表 1~表 3 所示.

由表 1~表 3 中计算结果可以得出以下结论: ①裂缝和气泡、夹渣不变矩特征值相差大, 可以设定一个阈值将其区分开; ②气泡和夹渣的不变矩特征值均值相差无几, 说明不变矩对图像的灰度不明感, 不能区分出气泡和夹渣; ③裂缝的不变矩特征值标准差相比气泡、夹渣而言较大, 说明裂缝的形状相对气泡、夹渣更不规则.

利用图像不变矩方法提取出缺陷的形状特征后, 就需要判定在什么条件下两种缺陷是属于同一类型, 本文采用欧氏距离相似度度量方法. 依据定义^[14], 模式样本向量 x 与 y 之间的欧氏距离为

$$D(x, y) = \|X - Y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (11)$$

其中, n 为特征空间的维数. 显然, 若样本 x 和 y 位于同一个类型区域里, 欧氏距离 $D(x, y)$ 是比较小的, 若它们位于不同的类型区域里, 欧氏距离 $D(x, y)$ 则是比较大的.

固体发动机缺陷识别过程中, 利用缺陷图像的 7 个不变矩特征值组成缺陷的特征向量, 计算测试缺陷图像与标准缺陷图像特征向量的欧氏距离, 作为缺陷的相似度判定依据. 经过实验数据统计分析, 选定 [16.8, 25.6, 38.4, 39.2, 68.9, 47.2, 69.1] 为裂缝的标准特征向量, 欧氏距离判定阈值设定为 15; 选定 [17.3, 42.1, 54, 43.1, 83.5, 59.2, 82.4] 为气泡和夹渣的标准特征向量, 欧氏距离判定阈值设定为 10.

表 1 裂缝的不变矩特征值
Table 1 Moment invariants eigenvalue of cracks

缺陷	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7
裂缝 1	17.1684	29.2860	38.6146	39.4552	68.8483	49.3795	68.7823
裂缝 2	16.6429	23.7868	37.2273	36.9267	64.3139	43.8500	66.0113
裂缝 3	16.2533	22.7666	38.4312	38.7736	67.7359	45.3962	69.2181
裂缝 4	17.0658	26.6666	39.2910	41.6765	74.5906	50.1379	72.4423
均值	16.7826	25.6265	38.3910	39.2080	68.8722	47.1909	69.1135
标准差	0.3636	2.5513	0.7443	1.6991	3.7003	2.6390	2.2817

表 2 气泡的不变矩特征值

Table 2 Moment invariants eigenvalue of bubbles

缺陷	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7
气泡 1	17.2824	41.5409	53.3931	42.7474	81.9481	58.6204	84.1228
气泡 2	17.2797	42.3243	55.1033	42.7496	82.0478	59.0397	81.8834
气泡 3	17.2817	43.8767	54.8462	42.8854	86.7367	59.9273	83.5396
气泡 4	17.2839	41.2317	52.4654	42.7407	81.6449	58.4776	80.4871
均值	17.2819	42.2434	53.9520	42.7808	83.0943	59.0163	82.5082
标准差	0.0015	1.0236	1.0779	0.0605	2.1081	0.5651	1.4271

表 3 夹渣的不变矩特征值

Table 3 Moment invariants eigenvalue of slag inclusions

缺陷	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7
夹渣 1	17.2830	43.0190	56.2053	43.2474	85.7160	59.9361	83.6080
夹渣 2	17.2816	42.6067	53.9484	43.4619	84.6982	59.9307	82.2449
夹渣 3	17.2791	41.2748	51.5984	42.8876	81.7862	58.6491	80.7489
夹渣 4	17.2772	40.8903	54.2757	43.3336	83.8276	58.9031	83.0731
均值	17.2802	41.9477	54.0069	43.2326	84.0070	59.3547	82.4187
标准差	0.0022	0.8878	1.6363	0.2133	1.4459	0.5856	1.0795

3.3 基于直方图分析缺陷识别

裂缝和气泡内部为中空,其 CT 值基本相同,反应在灰度图像上即灰度值基本相同.夹渣是固体发动机内部的杂质,其 CT 值与裂缝和气泡相差明显,即灰度值相差很大.因此,可利用灰度图像的直方图分析,区分气泡和夹渣.

裂缝 1、气泡 1 和夹渣 1 的灰度直方图分布如图 3 所示,图 3 中横坐标为图像的灰度级,文中图像为 256 级灰度图,纵坐标为该灰度像素在图像出现的数量.

由图 3 中可看出裂缝和气泡的灰度值分布集中

在 0~50 之间,夹渣灰度值分布集中在 100~175 之间.

缺陷的平均灰度均值如表 4 所示.

直方图分析法中,由于不同的 CT 检测设备生成的检测图像的灰度值有所区别,所以不能采用绝对灰度值来识别缺陷.由表 4 可知裂缝和气泡的灰度均值很接近,而与夹渣相差很大,可利用上节所述的欧氏距离判定.首先计算出裂缝的灰度均值作为标准值,再计算测试缺陷的灰度均值,求出两者之间的欧氏距离.欧氏距离小于设定阈值的缺陷为气泡,反之为夹渣.

表 4 缺陷灰度均值

Table 4 Gray mean of defects

缺陷	裂缝 1	裂缝 2	裂缝 3	裂缝 4	气泡 1	气泡 2	气泡 3	气泡 4	夹渣 1	夹渣 2	夹渣 3	夹渣 4
灰度均值	14.19	14.89	16.77	16.67	10.33	11.35	10.60	7.28	124.44	123.92	122.61	125.97

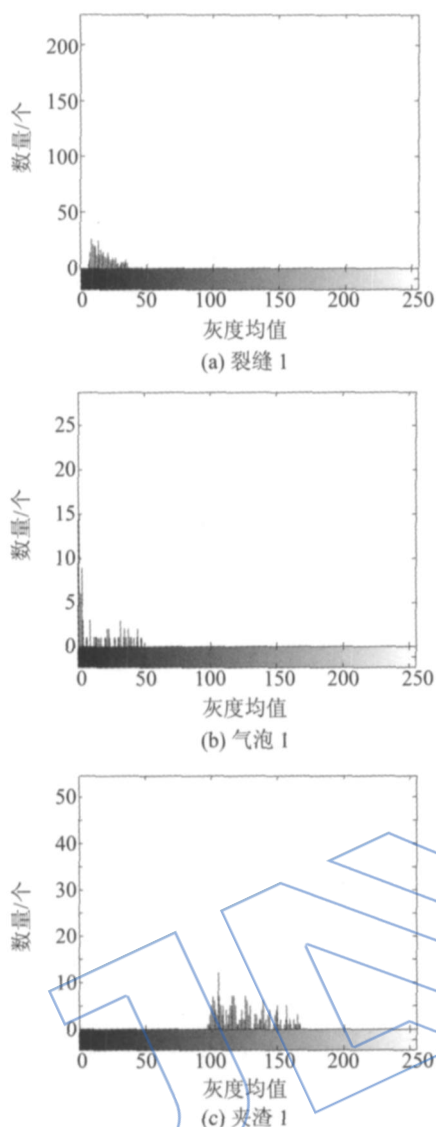


图3 缺陷灰度直方图分布

Fig.3 Gray histogram of defects

4 结 论

通过分析固体发动机中裂缝、气泡和夹渣3种类型缺陷的形状特征和外观特征,提出基于图像不变矩和直方图分析的级联组合式缺陷自动识别分类方法.该方法可准确的识别固体发动机的内部缺陷种类,而且方法简单实用,易于实现,可以应用到工程实践当中.但由于各种夹渣的密度值相近,重建出的图像灰度值在同一区间,本文的方法尚不能识别出夹渣的种类,这是下一步要解决的难点问题.

参考文献:

- [1] 叶云长. 计算机层析成像检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 82.
- [2] 杜亚娟, 张洪才, 潘泉. 基于矩特征的三维飞机目标识别

[J]. 数据采集与处理, 2000, 15 (3): 390-394.

DU Yajuan, ZHANG Hongcai, PAN Quan. Three-dimensional aircraft recognition using moments[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2000, 15 (3): 390-394. (in Chinese)

- [3] 田晓东, 刘忠, 周德超. 基于形状描述直方图的声呐图像目标识别算法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29 (7): 1049-1052.

TIAN Xiaodong, LIU Zhong, ZHOU Dechao. Mine target recognition algorithm of sonar image[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29 (7): 1049-1052. (in Chinese)

- [4] Chim Y C, Kassim A A, Ibrahim Y. Character recognition using statistical moment[J]. Image and Vision Computing, 1999, 17: 299-307.

- [5] 赵金才, 刘书桂. 基于图像不变矩和神经网络的零件位姿自动识别[J]. 传感技术学报, 2006, 19 (6): 2683-2686.

ZHAO Jincai, LIU Shugui. Automatic recognition for the position and pose of parts based on image moment invariants and neural network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19 (6): 2683-2686. (in Chinese)

- [6] 罗彬, 游志胜, 曹刚. 基于边缘直方图的快速汽车标志识别方法[J]. 计算机应用研究, 2004, 21 (6): 150-152.

LUO Bin, YOU Zhisheng, CAO Gang. The fast method in VLR based on edge directions[J]. Computer Application and Research, 2004, 21 (6): 150-152. (in Chinese)

- [7] 胡美燕, 姜献峰, 柴国钟. Hu矩在一次性输液针图像描述中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10 (2): 203-206.

HU Meiyan, JIANG Xianfeng, CHAI Guozhong. The application of Hu moment in image description about intravenous needles for single use[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10 (2): 203-206. (in Chinese)

- [8] Trier I D, Jain A K. Feature extraction methods for character using statistical moments[J]. Pattern Recognition, 1996, 29 (4): 641-662.

- [9] 甘俊英, 张有为. 基于不变矩特征和神经网络的人脸识别模型[J]. 计算机工程与应用, 2002, (7): 53-56.

GAN Junying, ZHANG Youwei. Face recognition based on moment invariants and neural networks[J]. Computer Engineer and Application, 2002, (7): 53-56. (in Chinese)

- [10] Hu M K. Visual patten recognition by moment invariants[J]. IRE Trans on Information Theory, 1962, 8: 179-187.

- [11] Wong Y R. Scene matching with invariant moments[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1978, 8: 16-24.

- [12] 吕洪涛, 周继成. 离散状态下的不变矩算法研究[J]. 数据采集与处理. 1993, 8 (2): 151-155.

L Ü Hongtao, ZHOU Jicheng. Research on discrete moment invariances algorithm[J]. Journal of Data Acquisition and Processing. 1993, 8 (2): 151-155. (in Chinese)

- [13] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

- [14] 蔡元龙. 模式识别[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 1999.