

航空发动机叶片损伤自动测量方法研究

李华¹ 陈果¹ 林桐¹ 陈新波² 王洪民²

(1. 南京航空航天大学 民航学院 江苏 南京 210016; 2. 海军航空工程学院 青岛校区 山东 青岛 266000)

摘要: 基于内窥镜的视觉检测技术在现代航空发动机故障诊断中发挥着重要的作用。针对航空发动机叶片的典型损伤,提出了一种基于三次样条插值的自动测量方法。对损伤叶片进行图像预处理并提取叶片轮廓,利用三次样条函数进行插值计算,通过对一次导数和二次导数的分析得到损伤尺寸。结合故障诊断方法,开发了航空发动机智能诊断专家系统。通过实验对比,证明了方法的有效性和正确性。

关键词: 航空发动机叶片; 样条插值; 自动检测

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-654X(2015)01-0052-04

Study on Automatic Measurement Method for Damage Aero Engine Lamina

LI Hua¹, CHEN Guo¹, LIN Tong¹, CHEN Xin-bo², WANG Hong-min²

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Qingdao Campus, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266000, China)

Abstract: The visual inspection based on endoscope has played an important role in modern fault diagnosis of aero engines. An automatic measurement method based on cubic spline interpolation is given to typical damage of the aero engine lamina in this paper. Firstly, this method is subjected to image preprocessing for damage lamina. The outline of lamina is extracted. Secondly, cubic spline function is used to interpolation and calculation. Through analysis of the first derivative and the second derivative to get the damage size. Based on this method, automatic intelligent diagnosis expert system combined with fault diagnosis method has developed. The comparative experiment is used to verify the effectiveness of the method.

Key words: aero engine lamina; cubic spline; automatic measurement

引言

航空发动机叶片作为发动机的结构件,是航空发动机最重要的零件之一^[1]。航空发动机叶片的结构对内、外的气流的作用是决定性的,直接关系到发动机整体性能的优劣,所以叶片的损伤是航空发动机故障最常见的情况^[2]。

随着现代科学的发展,发动机维修设备和手段的多样化,采用孔探技术对发动机损伤、故障隐患进行诊断以及判定损伤等级是新维修方式必不可少的关键环节。李长有等研究了基于孔探技术的发动机叶片损伤检测,依据损伤频谱能量检测并估计发动机叶片的损伤^[3]。田武刚等人研制了一种可用于航空发动机叶片原位检测的内窥涡流集成化检测探头,给出了航空发动机叶片的检测实例^[4]。陈果等人研究了一种基于孔探图像纹理特征的航空发动机内部损伤评估方法,利

用结构自适应神经网络模型,实现了航空发动机孔探图像损伤的自动识别^[5]。以上研究均以检测叶片损伤为目的,并不能准确测量损伤尺寸并给出维修建议,不能满足航空发动机故障诊断和维修的实际需求。

三次样条函数是一类在工程技术上应用十分广泛的插值函数^[6]。陈岭等人将由距离或信号强度的三次样条插值函数来调整经典衰减模型中的衰减因子,解决无线信号强度衰减模型计算效率低、构建复杂以及参数难确定等问题^[7]。王继东等人针对微网中基波频率的变动及谐波和间谐波的存在,提出了一种基于三次样条插值信号重构的谐波及间谐波分析算法^[8]。高小科等人结合指数矩阵的精细算法,提出了一类基于三次样条插值的精细积分方法^[9]。以上研究均将三次样条函数应用于工程,并取得较好的结果。本文针对航空发动机叶片的典型损伤问题,提出利用三次样条

收稿日期:2014-09-29 修订日期:2014-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目资助(61179057)

作者简介:李华(1989-),女,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为专家系统、智能诊断、图像处理。

插值的方法对缺陷尺寸进行自动测量,并对发动机故障快速作出诊断。首先,利用最大类间方差法对图像进行阈值分割并提取边缘轮廓,然后运用三次样条插值法拟合曲线,最后测量缺陷尺寸。此方法不仅消除了原始的人工测量中检查员操作正确性和经验的影响,而且极大地缩短了故障诊断时间。

1 叶片损伤的测量

对发动机部件进行可视检查时一般使用孔探仪进行。孔探仪测量可分为二维测量和三维测量。由于三维测量对孔探仪镜头有较高要求,因此,本文主要针对二维孔探图像进行研究。为了评估缺陷的损伤程度,实际孔探检查时,孔探工作人员往往需要测量压气机叶片和涡轮叶片。叶片的损伤一般出现在叶身前缘和后缘处,叶身的前缘和后缘边线可以近似为直线段,而有损伤的叶片轮廓形状往往是不规则的^[10]。需要测量的尺寸如图1所示。

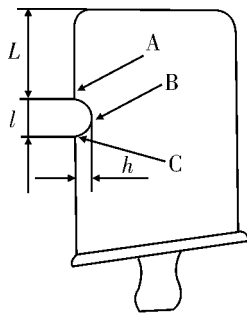


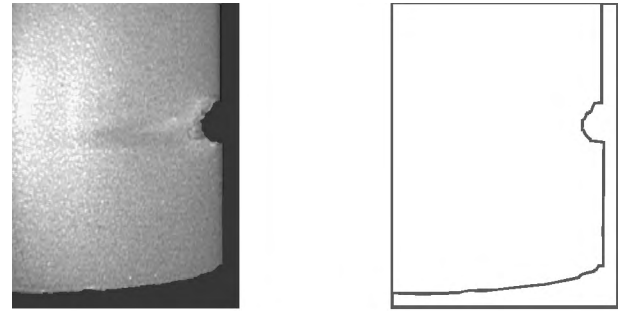
图1 压气机叶片损伤示意

图1中的L表示缺陷离叶片顶端(或尾端)的距离,l表示缺陷的宽度,h表示缺陷的深度。为此,需要找到图中A、B、C三个特征点,就可计算出损伤尺寸。

目前对孔探图像进行测量采取的是人工手动测量方法,这种测量方法的测量效率较低、准确性不高。全自动测量方法是先提取叶片缺陷的轮廓,然后根据三次样条插值方法找到缺陷部位的特征点并提取其尺寸,该方法优点是计算速度快、自动化程度高。但是如果图像过于复杂,边缘提取不够准确时,测量结果会存在较大偏差。

2 图像分割

图2(a)为某航空发动机叶片损伤图片,图2(b)是最大类间方差法分割后叶片边缘提取的结果图。



(a) 叶片损伤图 (b) 叶片边缘提取图

图2 叶片分割效果图

3 三次样条函数插值

3.1 叶片轮廓像素点的提取

叶片轮廓的提取流程如图3所示。首先得到单像素的叶片轮廓,然后建立坐标系,读取每个像素点的坐标并进行筛选。对于确定的x值确保只有唯一的y值与其对应。这样做是消除图像中的拐点,使曲线平滑,防止曲率为无穷情况出现,为后续计算插值导数做准备。为了计算方便,将x、y轴互换,然后对筛选后的坐标相邻两点之间取插值点,最后通过三次样条函数计算插值点y和各个点的一次导数、二次导数。

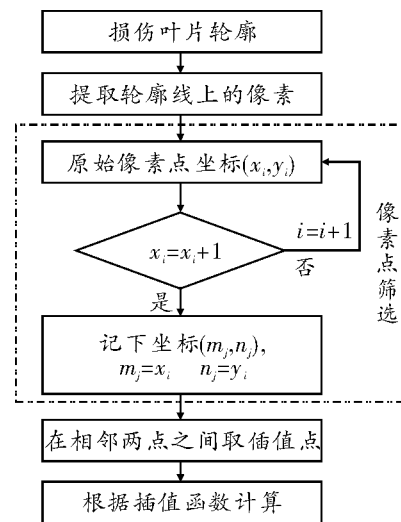


图3 叶片轮廓像素点的提取流程

3.2 三次样条插值

给定n个节点 $x_i (i = 0, 1, \dots, n-1)$ 上的函数值 $y_i = f(x_i)$ 及两端点上一阶导数值 $y'_0 = f'(x_0)$, $y'_{n-1} = f'(x_{n-1})$,利用三次样条函数计算各节点上的数值导数及插值区间 $[x_0, x_{n-1}]$ 上的积分近似值 $s = \int_{x_0}^{x_{n-1}} f(x) dx$,并对函数 $f(x)$ 进行成组插值及成组微商^[11]。

表1 轮廓像素点和插值点坐标

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
243	113	238	115
242	113	237	117
241	113	236	118
240	113	235	119
239	113	234	120

取部分轮廓像素点为例,坐标如表1中(*x*, *y*)所示。根据式(1)~(6)计算各个像素点处的一阶导数值,由式(7)计算二阶导数值。在区间[237, 240]内取插值点(237.25, 237.50, 237.75, 238.25, 238.50, 238.75, 239.25, 239.50, 239.75)。为了计算方便,在相邻两个像素点之间取3个插值点。

初始值设置为:

$$a_0 = 0 \quad b_0 = y'_0 = 0 \quad (j=0, 1, \dots, n-2) \quad (1)$$

$$h_j = x_{j+1} - x_j \quad (j=1, 2, \dots, n-2) \quad (2)$$

$$a_j = h_{j-1} / (h_{j-1} + h_j) \quad (j=1, 2, \dots, n-2) \quad (3)$$

$$\beta_j = 3 [(1 - a_j)(y_j - y_{j-1}) / h_{j-1} + a_j(y_{j+1} - y_j) / h_j] \quad (j=1, 2, \dots, n-2) \quad (3)$$

$$a_j = -a_j / [2 + (1 - a_j)a_{j-1}] \quad (j=1, 2, \dots, n-2) \quad (4)$$

$$b_j = [\beta_j - (1 - a_j)b_{j-1}] / [2 + (1 - a_j)a_{j-1}] \quad (j=1, 2, \dots, n-2) \quad (5)$$

$$y'_j = a_j y'_{j+1} + b_j \quad (j=n-2, n-3, \dots, 1) \quad (6)$$

计算*n*个结点上的二阶导数值 $y''_j (j=0, 1, \dots, n-1)$ 的公式如下:

$$y''_j = 6(y_{j+1} - y_j) / h_j^2 - 2(2y'_j + y'_{j+1}) / h_j \quad (j=0, 1, \dots, n-2) \quad (7)$$

$$y''_{n-1} = 6(y_{n-2} - y_{n-1}) / h_{n-2}^2 + 2(2y'_{n-1} + y''_{n-2}) / h_{n-2} \quad (8)$$

经计算可得到轮廓像素点对应的一阶、二阶导数值,如表2所示。

表2 轮廓像素点的导数值(部分)

<i>x</i>	<i>y</i>	y'	y''
243	113	0.101 52	0.279 02
242	113	-0.063 54	0.051 09
241	113	0.152 62	-0.483 4
240	113	-0.546 93	1.882 5
239	114	-0.964 88	-1.046 61
238	115	-1.593 55	2.303 95
237	117	-1.660 93	-2.169 2
236	118	-0.762 75	0.372 84
235	119	-1.288 09	0.677 84
234	120	-0.084 91	-3.084 2

利用各像素点上的函数值 y_i 、一阶导数值 $y'_i (i =$

$0, 1, \dots, n-1)$ 计算插值点 t 处的函数值、一阶导数值及二阶导数值的公式如下(其中 $t \in [x_i, x_{i+1}]$):

$$y(t) = [\frac{3}{h_i^2}(x_{i+1} - t)^2 - \frac{2}{h_i^3}(x_{i+1} - t)^3]y_i + [\frac{3}{h_i^2}(t - x_i)^2 - \frac{2}{h_i^3}(t - x_i)^3]y_{i+1} + h_i [\frac{1}{h_i^2}(x_{i+1} - t)^2 - \frac{1}{h_i^3}(x_{i+1} - t)^3]y'_i - h_i [\frac{1}{h_i^2}(t - x_i)^2 - \frac{1}{h_i^3}(t - x_i)^3]y'_{i+1} \quad (9)$$

$$y'(t) = [\frac{6}{h_i}(\frac{1}{h_i^2}(x_{i+1} - t)^2)] - \frac{1}{h_i}(x_{i+1} - t) y'_i - [\frac{6}{h_i}(\frac{1}{h_i^2}(t - x_i)^2 - \frac{1}{h_i}(t - x_i))] y'_{i+1} + [\frac{3}{h_i^2}(x_{i+1} - t)^2 - \frac{2}{h_i}(x_{i+1} - t)] y'_i + [\frac{3}{h_i^2}(t - x_i)^2 - \frac{2}{h_i}(t - x_i)] y'_{i+1} \quad (10)$$

$$y''(t) = \frac{1}{h_i^2} [6 - \frac{12}{h_i}(x_{i+1} - t)] y''_i + \frac{1}{h_i^2} [6 - \frac{12}{h_i}(t - x_i)] y''_{i+1} + \frac{1}{h_i} [2 - \frac{6}{h_i}(x_{i+1} - t)] y'_i - \frac{1}{h_i} [2 - \frac{6}{h_i}(t - x_i)] y'_{i+1} \quad (11)$$

经计算可得到插值点 t 对应的函数值 y 和一阶导数值 y' 、二阶导数值 y'' ,如表3所示。

表3 轮廓插值点的导数值

<i>t</i>	<i>y</i>	y'	y''
237.25	117.809 3	-0.757 97	-0.184 24
237.50	117.607	-0.888 02	-0.856 15
237.75	117.351 3	-1.186 04	-1.528 06
238.25	116.53	-2.061 03	-1.071 93
238.50	115.993	-2.188 01	0.056 12
238.75	115.459 5	-2.032 97	1.184 16
239.25	114.664 5	-1.122 91	1.471 94
239.50	114.421	-0.859 96	0.631 69
239.75	114.217	-0.807 07	-0.208 57

3.3 损伤特征点的提取

通过叶片轮廓像素点的提取和三次样条插值,计算出像素点和插值点的一阶导数和二阶导数,通过计算出的值可以得到损伤特征点。图4中A为叶片损伤轮廓的插值函数,B为此函数的二次导数。为了使叶片外形突变处不影响特征点的定位,需要先确定C、D点。首先在斜率平稳处记录计算起始点C和终止点D;然后在C、D之间寻找 y 值最小处,定位特征点G;

接着在 C、G 点中间寻找二次导数的绝对值达到最大的点,即为 E 点;在 D、G 点中间寻找二次导数的绝对值达到最大的点,即为 F 点。

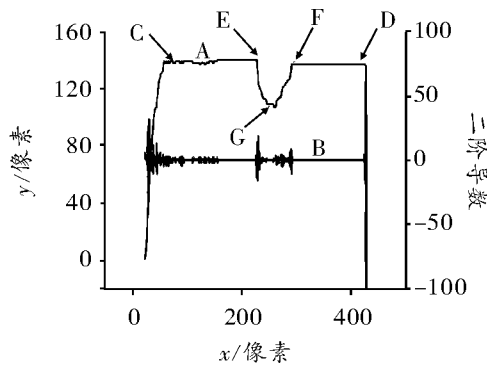


图4 轮廓像素点坐标

图4中C点的确定可以通过从第一个坐标点开始扫描,满足 $|y_i - y_{i+1}| \leq 0.1$ 条件时记录下起始点C。D点的取得则是从最后一个坐标点开始扫描,直到满足条件即可。

4 叶片损伤自动测量系统实例分析

本文用 Microsoft Visual C++6.0 作为前台的开发工具,Microsoft Access 2000 作为后台数据库支撑,开发了基于孔探图像的航空发动机智能诊断专家系统。系统将航空发动机内部损伤测量与诊断融为一体,提高了诊断准确性和工作效率。

现以某型飞机发动机叶片的打伤缺口损伤图像为例,进行损伤分析测量,如图5所示为叶片损伤自动测量系统界面。图中A、B、C即损伤缺陷的三个特征点。

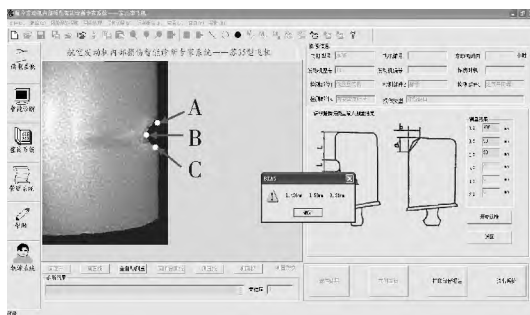


图5 航空发动机智能诊断专家系统

5 结束语

本文针对航空发动机叶片的典型损伤,提出了一

种基于三次样条插值的自动测量方法。该方法针对叶片某典型的损伤类型,充分利用图像处理技术提取边缘特征,自动提取出缺陷的起始点和顶点,自动计算出缺陷的尺寸,结合规则和案例诊断得到维修决策,实现了航空发动机的故障检测。基于此方法,开发了航空发动机智能诊断专家系统。通过实验验证了该方法的有效性和系统的可行性。

参考文献:

- [1] Oguzhan Y, Nabil G, Jian G. A Repair and Overhaul Methodology for Aeroengine Components [J]. Robotics and Computer - Integrated Manufacturing 2010, 26: 190 - 201.
- [2] Korakianitis T, Hamakhan I A, Rezaieenia M A, et al. Design of High-efficiency Turbomachinery Blades for Energy Conversion Devices with the Three-dimensional Prescribed Surface Curvature Distribution Blade Design (CIRCLE) Method [J]. Applied Energy 2012, 89: 215 - 227.
- [3] 丁鹏, 李长有, 马齐爽. 基于小波的航空发动机叶片孔探损伤检测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32 (12): 435 - 438.
- [4] 田武刚, 潘孟春, 罗飞路, 等. 航空发动机叶片的内窥涡流集成化原位检测 [J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(5): 101 - 105.
- [5] 陈果, 汤洋. 基于孔探图像纹理特征的航空发动机损伤识别方法 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1709 - 1713.
- [6] 高广花, 王同科. 两点边值问题基于三次样条插值的高精度有限体积元方法 [J]. 山东大学学报: 理学版, 2009, 44(2): 45 - 51.
- [7] 陈岭, 许晓龙, 杨清, 等. 基于三次样条插值的无线信号强度衰减模型 [J]. 浙江大学学报, 2011, 45(9): 1521 - 1538.
- [8] 王继东, 杜旭浩, 杨帆. 基于三次样条插值信号重构的微网谐波及间谐波分析算法 [J]. 电网技术, 2012, 36(11): 7 - 11.
- [9] 高小科, 邓子辰, 黄永安. 基于三次样条插值的精细积分法 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(9): 75 - 77.
- [10] 张勇, 刘冠军, 邱静. 基于图像自动测量的航空发动机故障检测技术研究 [J]. 机械科学与技术, 2008, 27(2): 176 - 179.
- [11] 徐士良. C 常用算法程序集 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.