

# 涡轮叶片孔距测量系统设计

## System Design Used to Measure Distance of Apertures on Turbine Vane

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所;

2.北京中国科学院研究生院;3.东北师范大学)

陈爱华<sup>1,2</sup> 王栋<sup>1,2</sup> 朱明<sup>1,2</sup> 杨本全<sup>3</sup>

CHEN AIHUA WANG DONG ZHU MING YANG BENQUAN

摘要:根据涡轮叶片上圆孔的特点,介绍一种快速检测涡轮叶片上圆孔距离的方案,该方案将采集的数字图像输入到计算机,根据事先给定的涡轮叶片上圆孔的模型,对图像进行匹配,然后对匹配区域进行二值化,经形态学处理,去除图像上小的噪声点,再检测出图像上的圆孔的大体位置,基于最小二乘原理确定圆孔的精确位置,由此得到圆孔间的距离和尺寸。此方法具有精确度高、速度快、抗干扰强的优点。

关键词:最小二乘法;圆拟合;形态学处理;相关匹配

中图分类号:TP394

文献标识码:A

Abstract: In terms of characteristic of apertures on turbine vane, A fast detect method which is used to measure the distance of apertures on turbine vane is introduced. First digital image is captured and input into computer, then based on model of the apertures on turbine vane which is known before, match the object area. After that for object area, finish the following steps: image segmentation, morphologic process, which is used to get ride of small wrong pixels, detecting the approximate situation of circular holes, which is based on least square method to detect the precise central coordinate of apertures. Then you can get the distance of the apertures and their sizes. This method has advantages of higher precision and rapid speed, as well as strong anti-jamming.

Key words: least square method, circle fitting, morphologic process, relation match

### 1 引言

影像检测技术是以现代光学为基础,融计算机图像图形学、计算机视觉、信息处理、光电子学和模式识别等科学为一体的现代检测技术,它把被测对象的图像当作检测和传递信息的手段,从中提取有用的信号来获得待检测的参数。因其具有非接触、适应能力强、快速高效、准确、柔性好、可靠性高等特点,在现代工业检测中受到了广泛重视。

近年,影像检测技术在国内外发展很快,已广泛应用于汽车、家电、机械制造、半导体及电子、化工、医药、航空、航天、轻工等行业来进行尺寸测量、航空遥感测量、精密复杂零件微尺寸测量和外观监测、光波干涉图、应力应变场状态图等和图像有关的领域。本文以检测涡轮叶片孔距为例,介绍一种检测工件上圆孔距离的方案,实验证明影像检测技术应用于工业产品的测量领域,在保证测量要求的同时,使系统具有非接触、适应能力强、快速高效、准确、柔性好、可靠性高、操作简便和成本低等特点。

### 2 系统的工作原理

测量系统的主要技术包括光学视像技术、光电信号转换技术、图像数据处理技术及几何参数评价软件等等,其测量原理流程如图1:

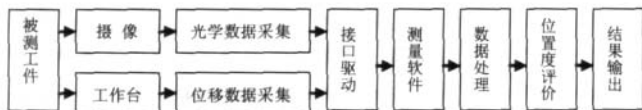


图1 测量原理图

该系统的基本工作原理为:由机械装置工作台控制涡轮叶片移动,通过图像传感器(CCD)获取被测物体图像的模拟信号,经过图像采集卡进行A/D转换,转换成数字信号,输入到计算

陈爱华:博士研究生

机,然后在计算机上对采集的图像进行算法处理,得出圆孔的位置,从而实现对被测物体的非接触测量。

由于涡轮叶片的表面是曲面,系统为了保证测量的精度,每次采集图像时,通过机械装置保证图像中有两个圆孔,然后再通过它移动涡轮叶片,将一个圆孔移出,同时进入一个新的圆孔,再测量圆孔的距离,从而实现涡轮叶片表面圆孔距离的精确测量,此系统旨在检测涡轮叶片加工的质量,先给出标准孔距,然后实际测得的孔距与标准孔距比较,如果超出了误差允许的范围,则判定圆孔加工失误。根据机械装置的移动距离和涡轮叶片上的孔距,模拟给出涡轮叶片上孔的相对位置,将合格和不合格的圆孔分别以不同的颜色标识,来通知加工者零件是否合格和加工失误的圆孔的位置,以便及时改正。

### 3 软件算法实现

#### 3.1 软件实现方案:

本方案按照以下步骤实现:

第一步:相关匹配 本步骤旨在寻找圆孔所在的区域,由于图像的模板尺寸较大,为了缩短图像的处理时间,采用金字塔匹配算法;

第二步:二值化处理 本方案采用循环迭代的方法获取阈值;

第三步:形态学处理 由于图像的纹理比较清晰,图像二值化后可能会有许多小的噪声点,本步骤旨在去除图像上噪声点的干扰;

第四步:初步确定圆孔的位置 采用质心检测初步确定圆孔的位置和尺寸;

第五步:轮廓提取 本步骤旨在提取圆孔的轮廓,为下一步做准备;

第六步:采用最小二乘法,确定圆孔的位置和尺寸,并得到圆孔的间距。

#### 3.2 相关匹配

涡轮叶片的图像如图2所示:涡轮叶片的表面纹理清晰,不能直接采用边缘检测来获取圆孔的边缘,而且光照不均匀,因在

整个区域内对图像进行处理很复杂,由此想到缩小处理的图像范围,先给定圆孔的模板,进行相关匹配,找出图像中圆孔的大体位置,然后在圆孔所在的区域内进行局部处理,既缩短了图像的处理时间,又保证了检测的精度。由于图像的模板尺寸相对较大,直接匹配所用时间较长,在此采用金字塔匹配算法,它是一种由粗到精的搜索方法,简单概括是在不同的匹配层次上,用不同的搜索步长在待匹配图像上进行搜索,具体步骤如下:

第一步:选择初始步长,在当前帧图像中围绕当前帧图像中心点均匀分布 8 个图像子块,并分别进行匹配比较;

第二步:将步长减为原来的一半,图像的中心移到第一步中比较结果最小误差点处;

第三步:重复第一步和第二步,直到步长小于或等于 1 个像素。

为了缩短处理的时间,以下的处理都是在匹配所得的圆目标所在的区域内进行的局部处理。

### 3.3 形态学处理

在形态学处理之前,先对图像进行二值化,在此采用循环迭代的方法获取阈值,即反复计算目标区域和背景区域灰度的平均值,以其二者的平均值为阈值,直至前后两次阈值的差小于某一给定值为止。

为了去除噪声点的干扰,二值化处理后对图像进行形态学处理。形态学图像处理以在图像中移动一个结构元素并进行一种类似卷积操作的方式进行。像卷积一样,结构元素可以具有任意的大小,也可以包含任意的 0 与 1 的组合。在每个像素位置,结构元素核与在它下面的二值图像之间进行一种特定的逻辑运算,逻辑运算的二进制结果存在输出图像中对应于该像素的位置上。

基本的形态学运算是腐蚀和膨胀,简单的腐蚀运算是消除物体所有边界点的一种过程,结果使剩下的物体沿其周边比原来的物体小一个像素,简单的膨胀运算是将与某物体接触的所有边界点合并到该物体中的过程,结果使物体的面积增大了相应的像素点。在腐蚀和膨胀的基础上,可以构造出形态学运算族,其中两个最为重要的组合运算是开运算和闭运算,开运算先腐蚀后膨胀,它具有消除细小物体,在纤细点处分离物体和平滑较大物体的边界时不明显改变其面积的作用;闭运算先膨胀后腐蚀,它具有填充物体内的细小空洞、连接邻近物体、在不明显改变物体面积的情况下平滑其边界的作用。

为了不明显的改变目标的边界并可以去除较大的干扰点,本方案中采用开运算,结构元素采用  $3 \times 3$  模板。

### 3.4 圆孔的确定

圆孔位置确定包括以下三个步骤:初步确定两圆孔的位置,轮廓提取,精确确定两圆孔的位置。

#### 3.4.1 初步确定圆孔位置

形态学处理后,将目标区域左右平分为两部分,在这两个区域中分别用质心算法初步确定两圆的位置和圆孔的半径初值,设圆孔的坐标为  $(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_m, y_m)$ , 则质心坐标和半径初值为:

$$\text{圆孔的质心: } x_m = \frac{\sum_{i=0}^m x_i}{m}, \quad y_m = \frac{\sum_{i=0}^m y_i}{m} \quad (1)$$

$$\text{半径的初值: } r = \sqrt{\frac{m}{\pi}} \quad (2)$$

#### 3.4.2 精确确定圆孔的位置

在确定圆孔的精确位置之前,先对图像进行轮廓提取,然后采用最小二乘拟合原理确定圆孔的精确位置,以下简要介绍最小二乘拟合的原理:

最小二乘法是依据残差平方和最小原理得出的,设圆的方程为:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (3)$$

$$\text{残差为: } \varepsilon_i = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2 \quad (4)$$

其中  $x_i, y_i$  为圆孔的边缘点

$$\text{残差平方和为: } Q = \sum \varepsilon_i^2 = \sum [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \quad (5)$$

由残差平方和最小,则圆心坐标及半径偏导值为零:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial Q}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

$$\text{即: } \begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = 2 \sum [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)(x_i - a) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 2 \sum [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)(y_i - b) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial r} = 2 \sum [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]r = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{简化整理式(7)得: } \begin{cases} a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b - r^2 + \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = 0 \\ \bar{x}a^2 - 2\bar{x}^2a + \bar{x}b^2 - 2\bar{x}y\bar{b} - \bar{x}r^2 + \bar{x}^3 + \bar{x}\bar{y}^2 = 0 \\ \bar{y}a^2 - 2\bar{x}y\bar{a} + \bar{y}b^2 - 2\bar{y}^2\bar{b} - \bar{y}r^2 + \bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}^3 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{式(8)中的各参数可用式(9)表示: } \bar{x}^m \bar{y}^n = \frac{\sum x_i^m y_i^n}{\sum 1} \quad (9)$$

$$\text{对式(8)化简整理可得圆参数为: } \begin{cases} a = \frac{(\bar{x}^2 \bar{x} + \bar{x} \bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x} \bar{y}^3)(\bar{y}^2 - \bar{y}^3) - (\bar{x}^2 \bar{y} + \bar{y} \bar{y}^2 - \bar{x}^2 \bar{y} - \bar{y}^3)(\bar{x} \bar{y} - \bar{x} \bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^3)(\bar{y}^2 - \bar{y}^3) - 2(\bar{x} \bar{y} - \bar{x} \bar{y})^2} \\ b = \frac{(\bar{x}^2 \bar{y} + \bar{y} \bar{y}^2 - \bar{x}^2 \bar{y} - \bar{y}^3)(\bar{x}^2 - \bar{x}^3) - (\bar{x}^2 \bar{x} + \bar{x} \bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x} \bar{y}^3)(\bar{x} \bar{y} - \bar{x} \bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^3)(\bar{y}^2 - \bar{y}^3) - 2(\bar{x} \bar{y} - \bar{x} \bar{y})^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b + \bar{x}^2 + \bar{y}^2} \end{cases} \quad (10)$$

为了提高精度,通过该方法求得拟合圆,然后计算边缘上的点到该圆的距离,将距离较大的伪边缘点除去,再进行一次拟合。

## 4 实验结果

下图是涡轮叶片圆孔图像,参数如下:图像尺寸为  $768 \times 576$ ,图中选用的模板尺寸为  $500 \times 150$ ,阈值为 96,单帧图像处理的结果如图 3 所示:图中用白色的十字叉给出圆孔的位置,拟合圆孔的大小由白色的圆圈出。其中左边圆孔的位置为  $(152.8, 272.6)$ ,半径为 21.3,右边圆孔的位置为  $(500.0, 270.3)$ ,半径为 26.9。在主频为 1.83G,内存 256M 的电脑上仿真实验,单帧图像处理的时间为 89ms 左右。

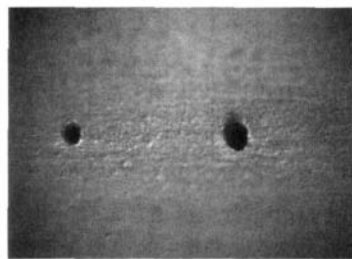


图 2

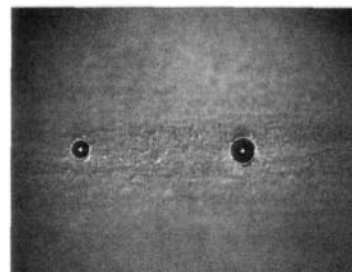
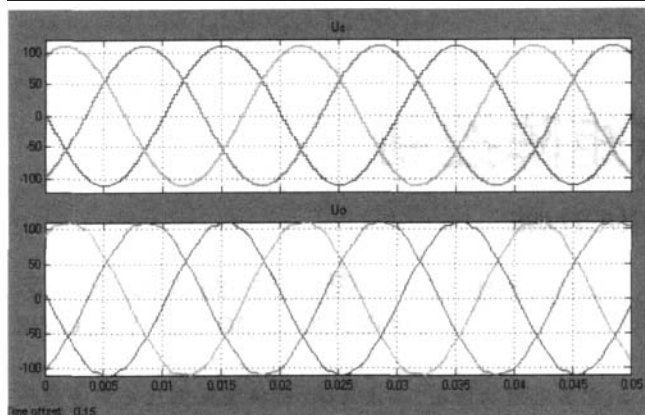


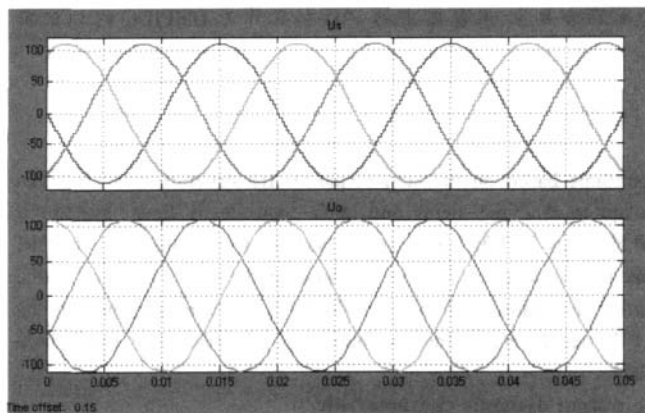
图 3

(下转第 17 页)





(a)



(b)

图 4 (a)  $\cos \varphi = 1$  时电网电压(上)和输出电压波形(下)(b)  $\cos \varphi = 0.9$  时电网电压(上)和输出电压波形(下)

## 参考文献

- [1]马昕霞,宋明中,李永光,蔡方伟.风力发电并网技术及若干问题的研究.吉林电力 2006.8
- [2]王承凯,许洪华,赵斌.基于 SIMULINK 的失速型风电机组软并网控制系统的仿真分析.太阳能学报 2004.10
- [3]赵斌,许洪华.大型风力发电机组的软并网控制系统.新能源 2000-22
- [4]Seung-Ho Song, Shin-il Kang, Nyeon-Kun Hahm. Implementation and Control of Grid Connected AC-DC-AC Power Converter for Variable Speed Wind Energy Conversion System. 0-7803-7768-0/03/\$17.00 (C) 2003 IEEE
- [5]李晶,王伟胜,宋家骅.变速恒频风力发电机组建模与仿真.电网技术 第27卷第9期,2003年9月
- [6]褚军舰,王艳,殷天明.开关磁阻电机并网逆变模块设计.[J]微计算机信息,2005,21(8):1:98-100
- [7]叶国平,吴耿锋,严伟.空间电压矢量 PWM 的实现.[J]微计算机信息,2004,7:61-62

作者简介:王星华(1982-),男,籍贯辽宁海城,上海交通大学电子信息与电气工程学院电机与电器专业硕士研究生。主要研究方向为风力发电控制。

Biography:Wang Xinghua (birth 1982-), Male, Liaoning Province, Shanghai Jiao Tong University, Master, Motor, Area Wind Power Control (200240 上海 上海交通大学电气工程系)王星华 (Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240)

Wang XingHua

通讯地址:(200240 上海 上海交通大学闵行校区 B0403191班)王星华

(收稿日期:2007.7.23)(修稿日期:2007.8.25)

(上接第 65 页)

## 5 结束语

本文介绍了一种检测涡轮叶片上圆孔距离的方案,此方案是根据沈阳黎明厂提出的涡轮叶片孔距测量仪设计制造技术要求制定,它处理精度高,检测速度快,稳定性强,可以实现遍历检测,保证了工件的质量,并对工件没有任何损伤,将它应用于工业检测中大大提高了产品质量,节约人力资源,带来可观的经济效益。

## 6 创新观点

本文作者创新点:采用模板匹配的方法寻找目标的区域范围,为了缩短图像的处理时间,采用局部区域处理,为了达到较高的精度,采用最小二乘拟合获取圆孔的圆心和半径。

## 参考文献

- [1](美)Kenneth R. Castleman 著.朱志刚,林学闯,石定机等译.数字图像处理.电子工业出版社.2002,394-400.
- [2]陈华华,杜歆,顾伟康.基于区域匹配的实时加速技术.传感技术学报.2006,19(1).
- [3]张鹏,卢广山,王合龙,田青.基于三步搜索法的特征相关目标跟踪算法.光电与控制.2004,11(4).
- [4]孔兵,王昭,谭玉山.基于圆拟合的激光光斑中心检测算法.红外与激光工程.2006,31(3).
- [5]黄劫,周肇飞,邓建清,李俊国.基于圆拟合的孔系中心坐标高精度检测方法研究.工具技术.2004,38(4).
- [6]牛刚,梁伟.基于特征像素统计的图像相关匹配算法[J]微计算机信息.2005,11-3.

作者简介:陈爱华(1981-),女,山东省泰安市人,博士研究生,主要从事数字图像处理;朱明(1964-),男,江西省南昌市人,研究员,博士生导师,主要从事数字图像处理、电视跟踪和自动目标识别技术的研究。

Biography:Chen Aihua (1981-), female, born in TaiAn, doctor, major in image processing; Zhu Ming (1964-), male, born in NanChang. Professor, major in image processing.

(130033 吉林长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)陈爱华 王栋 朱明

(100039 北京 中国科学院研究生院)陈爱华 王栋 朱明

(130024 吉林长春 东北师范大学)杨本全

通讯地址:(130033 长春市东南湖大路 16 号 长春光学精密机械与物理研究所图像研究室 1316 室)陈爱华

(收稿日期:2007.7.23)(修稿日期:2007.8.25)

## 微计算机信息杂志 旬刊

每册定价:10 元 一年订价:360 元

地址:北京海淀区皂君庙 14 号院鑫雅苑 6 号楼 601 室  
微计算机信息杂志收 邮编:100081  
电话:010-62132436 010-62192616 (T/F)