

金属球面缺陷的图像检测方法

西安理工大学 陕西西安, 西安交通大学 陕西西安, 111

摘要: 为解决测量速度和精度之间的矛盾, 提出了一种用图像识别技术探测缺陷的大致位置、用激光位移传感器精确测量缺陷三维形貌的测量方法。设计了扫描测量球形表面的图像和数据采集装置。在分析图像特点的基础上, 采用低通滤波算法降低了图像背景噪声。根据当前待处理图像上极大极小值的包络线差值信息, 初步确定了缺陷的大致位置和区域。用 Zernike 模型迭代逼近到缺陷的边界。讨论了缺陷三维形貌数据的处理和表征方法。该方法在复杂背景图像分割的自适应能力方面比传统方法更具优势。测量系统能满足自动、可靠地检测金属球面缺陷的需要。

关键词: 表面缺陷; 测量方法; 图像识别; 数据处理

中图分类号: S%&fi .1 文献标识码: 文章编号: &_-' ' ' ' ' ' fl ~ (fif ~1

An Image Measurement for Defect on Metallic Spherical Surface

) * +,ž- ~ . /O +1ž 2# ~ 34/ 45ž-

(. Xi an University of Technology, Xi an, Shaanxi ~~~, China; . Xi an Jiaotong University, Xi an, Shaanxi ~~~, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between the measurement speed and accuracy, a method of detecting the approximate position of defects using image recognition technology and measuring the three-dimensional morphology of defects precisely using laser displacement sensor is proposed. The scanning measurement device for spherical surface image and data acquisition is designed. On the basis of analyzing the image characteristics, the low-pass filtering algorithm is used to reduce the background noise of the image. According to the difference information of the envelope line of the maximum and minimum values of the current image to be processed, the approximate position and region of the defect are determined. The Zernike model is used to iteratively approach the boundary of the defect. The processing and representation method of the three-dimensional morphology data of the defect is discussed. This method has more advantages than the traditional method in the self-adaptability of complex background image segmentation. The measurement system can meet the need of automatic and reliable detection of metal spherical surface defects.

Key words: surface defect; measurement method; image recognition; data processing

1 引言

表面缺陷的检测涉及面非常广。球形工件表面缺陷的正确检测在很多场合是非常必要的。因其表面特殊性使自动检测存在许多难点。被测对象不同特点不同, 测量方法不同^[1-3]。最佳测量系统设计和数据处理方法等都是非常值得研究的。

表面缺陷检测的一个特点是必须对所有关心的表面进行检测。但正常加工的产品往往合格率高, 缺陷很少或者没有。当然在有缺陷的地方, 需要对缺陷进行精细测量。而这种精细测量用在无缺陷的地方显然是一种浪费。特别是测量精度高时, 测量效率会明显降低。为解决精度和速度之间的矛盾, 采用了图像处理方法初步确定缺陷的位置和分布。用基于三角法的激光位移传感器在缺陷附近扫描测量, 以实现高效的精确测量。

为获得三维表面信息采用了扫描测量的方法。数据处理分几步进行。首先根据图像上缺陷部分具有明暗变化的特点, 用极大极小值的包络线差值信息, 在整幅图上先找到缺陷的大致位置。相当于利用待处理图像的灰度极小点构造了一幅背景图像。然后在比较小的区域内用 Zernike 模型迭代逼近到缺陷边界, 以实现缺陷的自适应提取。最后用激光位移传感器获取三维形貌, 为缺陷正确评价和表征提供全面的信息。

2 测量系统和数据采集

测量系统为非正交坐标测量机, 有两套测量子系统。图 1 是测量装置原理图和实物照片, 摄像机和激光位移传感器的位置由光栅传感器测量和伺服电机控制。

摄像机在 θ 范围移动的过程中, 光轴总是通过球心、到被拍表面距离不变。光源位于摄像机运动面的一

侧、与摄像机光轴成适当角度, 保证球的内外表面拍摄区域照明的前提下, 尽量避免强反射光进入拍摄图像。同时在测量过程各运动部件之间不应发生干涉。将摄像机旋转到 θ , 转台旋转到 φ , 采集一次数据, 转台转完一周后, 再改变 θ , 直到整个球面扫描测量完。

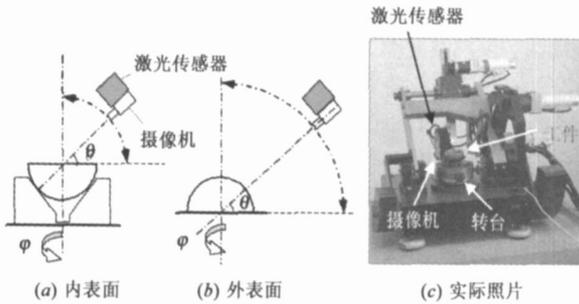


图1 传感器与工件位置关系和实物照片

激光位移传感器可平移到摄像机的位置处, 运动控制与摄像机相同, 用于后续缺陷三维形貌的扫描测量。其原理见图2, 半导体激光器发出的光线, 经发射光学系统聚焦后形成一个很细的平行光束, 垂直入射到被测物体表面上, 被测物体移动或其表面变化, 都会导致入射点沿入射光轴方向移动, 接收光学系统接收光点的散射光, 并成像在 LLP 敏感面上。LLP 上光斑中心位置坐标的变化量为 δ , d 为表面法线方向的变化量, 根据几何关系有

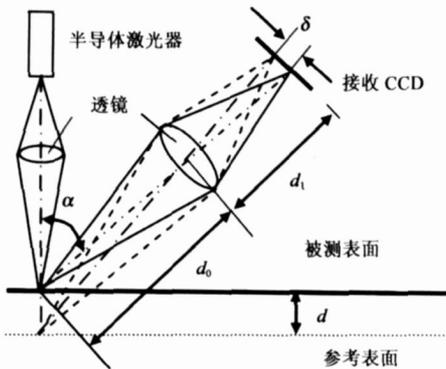


图2 激光位移传感器的原理

$$dQ \frac{d-\delta}{d}; \alpha \quad ()$$

激光光点在被测三维表面上密集扫描, 计算出相应点的 d 后, 就可实现三维测量。

测量时先用图像识别方法快速找到缺陷的位置和范围, 再用非接触激光位移传感器对缺陷进行三维形貌的精确测量, 为定量评价和分析提供全面的数据。但精测部分属于点扫描方式, 扫描间隔越小, 精度越高, 速度越慢, 图像处理部分所做的工作能大大地缩小精测部分的工作量, 对提高效率具有非常重要的意义。

3 缺陷检测的数据处理方法

激光位移传感器进行三维形貌的精确测量技术比

较成熟, 难点在图像处理部分的数据处理。由于采用多幅图像扫描测量的方式, 很容易想到用无缺陷的图像与有缺陷图像相减, 但工件不可能是理想的标准球, 利用这种背景不能有效地提取缺陷信息。在只能用单幅图像处理的前提下, 因背景纹理和缺陷信息都是随机的, 利用纹理分析^[8]、小波变换^[1]、傅里叶变换^[9]等原理检测出的边缘都比较乱。为此需要根据图像特征设计处理方法。

3.1 缺陷特征分析和滤波处理

经分析大量实验图像, 发现斜光照明能比较有效地增强图像中的缺陷信息, 但球形工件因曲率、形状误差、表面纹理等影响, 使图像背景不均匀, 同时缺陷本身高低不平, 形状不规则, 简单地用一般阈值分割法是无法获得满意效果的。图3为两幅有表面缺陷的图像。但图像中背景噪声和缺陷的空间频率及幅值有差别, 只有采取相应的处理才能达到目的。

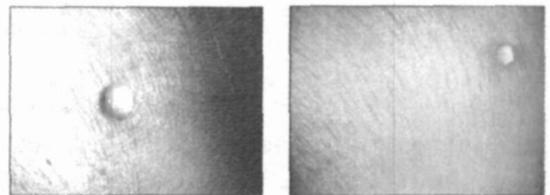


图3 两幅含缺陷的原图 (大小为 768×576)

由于成像条件的限制, 图像中噪声比较明显, 纹理较大, 中值滤波、均值滤波等对这部分滤波效果往往不够理想, 所以采用比较灵活的频域低通滤波。算法用快速傅里叶变换。设原图像 $f(x, y)$, 傅里叶变换为

$$F(u, v)Q \int_{x=0}^{M-1} \int_{y=0}^{N-1} f(x, y) \#^{2\pi} \left(\frac{xu}{M} \frac{yv}{N} \right) \quad ()$$

u, v 为频域变量, M, N 为图像的大小。保留低频分量

$$F(u, v)Q \begin{cases} \sim, & u S v T r_{\tilde{z}, \tilde{z}} \\ F(u, v), & u S v \cdot r_{\tilde{z}, \tilde{z}} \end{cases} \quad (&)$$

$r_{\tilde{z}, \tilde{z}}$ 为频域低通圆形区域的半径, 经逆变换的图像为

$$f(x, y)Q \frac{M-N}{u=0, v=0} F(u, v) \#^{2\pi} \left(\frac{xu}{M} \frac{yv}{N} \right) \quad (1)$$

3.2 缺陷的初步判断

滤波处理减小了噪声, 但背景不均匀, 单一阈值依然不能有效地提取缺陷。如果能有一个背景图像就可以采用减影的方法, 但在自动检测过程中背景会随半径、材质、不同的扫描位置而不同, 所以最好的办法是用当前处理图像的信息构造一个背景图像。

为了实现上面的目的, 先分析一下缺陷处的数据特征。图1(a)是图3(a)在 \tilde{z} 行、图1(b)是图3(b)在 \tilde{z} 行的灰度分布及相关数据。图中缺陷部分上下包络线的差值较大, 若用整幅图像的下包络线的数据构造

一幅 背景图像 , 上包络线构造一幅 待处理图像 , 两幅 图像 相减能使缺陷区域突显出来.

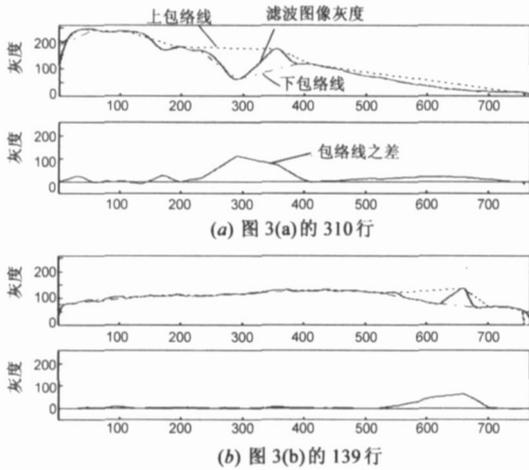


图 4 图像某行灰度及数据曲线

对于数字图像, 数据均为离散值, 极值点的判断可以用当前像素与相邻两个像素的灰度关系来确定. 当 $f(x, y) \geq f(x_S, y)$ 并且 $f(x, y) \geq f(x_R, y)$ 时, 点 (x, y) 为局部极大值点; 当 $f(x, y) \leq f(x_S, y)$ 并且 $f(x, y) \leq f(x_R, y)$ 时, 点 (x, y) 为局部极小值点. 找出极值点后, 用线性插值的方法计算非极值点处的数据, 以获得上下包络线.

但为了放大 缺陷处差值信息, 对极值点需进一步处理. 对于局部极值点 g_i , 与前后两极值点 g_{iR} 和 g_{iS} 连线的斜率为 k_{iR} 和 k_{iS} , 见图 K. 对于极大值点, 当 $k_{iR} > 0$ 并且 $k_{iS} < 0$, 则取消该极值点; 对于极小值点, 当 $k_{iR} < 0$ 并且 $k_{iS} > 0$, 则取消该极值点, 这样包络线为图 K 中的虚线, 而不是点划线.

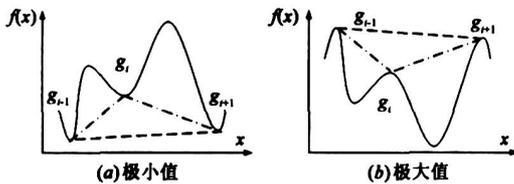


图 5 极值点判断

为了能适应变化的图像信息, 阈值选择可以利用图像方差 σ , 它是一个统计特征, 与对比度、灰度的分散性等有关, 设平均值为 μ , 则整幅图像的方差为

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_x \sum_y (f(x, y) - \mu)^2 \quad (K)$$

阈值取 $T = c \cdot \sigma$, c 为一系数.

用 $\Delta(x, y)$ 表示 背景图像 与 待处理图像 的差值, 可用下式判断, 大于阈值 T 的为缺陷区域.

$$f(x, y) \begin{cases} f(x, y), & V\Delta(x, y) > T \\ \sim, & V\Delta(x, y) \leq T \end{cases} \quad (L)$$

因为缺陷的上下边缘信息在水平方向分析时较

弱, 而在垂直方向的信息较强, 反之亦然, 所以应在行和列两方向分别进行上面的处理, 只要水平或垂直方向中有一个方向判断为缺陷区域的点就是 种子 点.

系数 c 的选择原则是: 图像 $f(x, y)$ 在背景区域不能出现 \sim 的前提下, 使缺陷区域能找到尽量多的 种子 点, 但要保证找到的区域一定在缺陷上, 以后的工作就可以在这些点的附近进行. 考虑到缺陷的边界应是封闭的, 也为编程方便起见, 用这些 种子 点的重心为圆心、 W & 倍的等效半径为半径作一个圆形, 进一步的研究就在这个圆形区域内进行.

3.3 缺陷边界的逼近

按理说缺陷的边缘应存在一定的梯度信息, 可以用 ∇ 等微分算子进行边缘检测, 但原始图上背景噪声的梯度也比较大, 缺陷边缘和背景噪声的强弱相当, 此时这些算子的检测效果不理想.

在 \cdot 节判断有无缺陷时, 实际上只用到两个方向的信息, 这样才会出现其它方向信息不能突出的问题, 而 ∇ 模型^[6] 是一种局部边缘检测算子, 可以利用灰度图像梯度信息、以能量函数 E 极小化寻找局部形变物体的边缘, 比较适合信息较弱的边缘搜索.

∇ 模型是 X₁ 于 1976 年提出的 ∇ 是一条由若干个控制点控制、连续的、封闭的弹性曲线

$$u(s) = Q [x(s), y(s)] \quad (c)$$

$x(s)$ 和 $y(s)$ 为控制点在图像中的坐标, s 是变换形式描述边界的自变量. ∇ 模型定义的目标能量函数为

$$EQ = \int_s \left[\frac{\alpha}{2} \left| \frac{\partial u}{\partial s} \right|^2 + \beta \left| \frac{\partial u}{\partial s} \right| S E_{\text{reg}}(u(s)) \right] ds \quad (d)$$

前两项合称内部能量, 控制轮廓线的弹性形变. 后一项是外部能量, 通常为灰度图像 $I(u)$ 的梯度函数

$$E_{\text{reg}}(u(s)) = Q R V \nabla I(u(s)) V \quad (f)$$

选取适当的参数 α 和 β , 使能量函数 E 极小化, 所对应的 $u(s)$ 就是对目标的分割. 具体算法可参考相关文献. 然后根据 ∇ 模型找到的边界, 计算缺陷坐标和大小等信息, 提供给精测部分进一步测量.

3.4 缺陷的三维形貌测量和表征

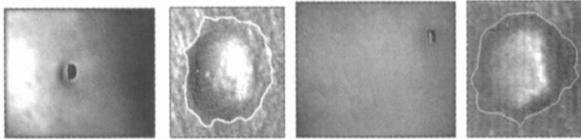
由于拍摄图像时受环境和缺陷形貌的影响较大, 上面方法提取的缺陷信息必然存在误差, 而且只有二维信息, 所以激光位移传感器对缺陷三维形貌的精确测量是必要的.

根据测量原理, 激光位移传感器采集的数据是相对测量机构控制的理想球面法线方向的高度差, 将各数据点转换到相应的空间上, 就可获得扫描区域的三维信息. 由非缺陷区域的坐标点用最小二乘法拟合一个基准球面, 然后选择合适的阈值进行判断, 可从空间尺寸上准确地确定缺陷的位置和形状.

缺陷的表征主要有缺陷在球面上的位置坐标、缺陷高度(或深度)、面积、缺陷的分布等,这些参数可为实际工程的定量分析提供依据.

4 实验效果和讨论

对图 6 中缺陷的初步判断和 Snakes 模型边界逼近的局部放大效果见图 6,参数取 αQ , βQ . 虽然找到的种子点没有完全覆盖缺陷,但能准确地找到缺陷所在区域,所以利用背景图像可以快速确定缺陷的大致范围. 由于 Snakes 模型从原理上讲能逼近不规则的曲线,所以除划痕、裂纹等线形缺陷外,此方法均能获得比较满意的效果.



(a) 内表面缺陷的效果 (b) 外表面缺陷的效果

图 6 缺陷的判断和 Snakes 边界逼近

从数学角度讲,平面是半径为无穷大的球面,所以图像处理部分的方法也适用于平面上缺陷的检测,图 7 为平面上一个凸起缺陷的检测过程.



图 7 平面上凸起缺陷图像的检测过程

目前图像处理部分可以粗略地给出缺陷的坐标位置、分布和面积,能够识别 $\sim K??$ 以上的缺陷,需要检测更小的缺陷,可以增加光学系统的放大倍数,但当缺陷与背景噪声尺度相当时,缺陷信息不能有效地突出,检测效果不好.

精测部分的分辨率为 $K\mu?$,它除了测量缺陷的三维形貌尺寸外,还能完成工件其它几何尺寸的测量. 检测结果主要以表格形式给出,部分检测结果示例如表 1. 为直观地了解缺陷三维形貌,也可用 $O\#\check{z}$ 进行三维图形显示.

表 1 内外表面缺陷的测量结果

| 缺陷编号 | $\theta(?)$ | $\varphi(?)$ | 高度/深度(??) | 面积(??) |
|------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 内球面 | $\check{z} \cdot iK_c$ | $\check{z} \cdot iKK$ | $\check{z} \cdot Kfi$ | $\check{z} \cdot \check{z}$ |
| | $i \cdot \&\&$ | $\check{z} \cdot \check{z} \cdot 1$ | $\check{z} \cdot K_iK$ | $(\cdot //$ |
| 外球面 | $\&$ | $\& (fiK$ | $\check{z} \cdot \&$ | $\check{z} \cdot fi_c$ |
| | i | $\& \cdot \&K\&$ | $\check{z} \cdot K_c$ | $(\cdot /K/$ |

虽然两套测量系统均可单独使用,且部分测量结果也比较接近,但将两者配合使用,可以避免各自的弱点,达到速度快、精度高的目的. 经多次反复测量,重复性比较高.

5 结论

本文提出了球形金属表面上缺陷自动扫描的图像检测方法,它充分发挥了测量系统软件和硬件的优势,快速识别与精确测量相结合,解决了精度和效率之间的矛盾,为缺陷的进一步分析奠定了可靠的基础. 缺陷的图像识别方法克服了传统方法对不同背景图像自适应能力差的弱点,对复杂背景下提取复杂目标的其它应用也有一定的参考价值.

参考文献

[1] J P #z, : ' :iG# Y7#8 H #7,#zz# LE7,:9@E# P1?5z9 #9 !; O,:5z :D:9#? >57 8#=#-9 ,? !-,z- 8#9#-95z l z8 =E!7!-9#7G,19,5z 5z ! :@#=#!7 :17!-# 5> ! &P 5C#=#-9 j J? 6? !-# l z8 O,,:5z L5?@19 ,z- ~~~~~~ flLK (fiR K/~

[2] J 乐静 郭俊杰 朱虹 等 一种快速检测光滑半球表面缺陷的方法 [J] 光电工程 ~~~~ 1 ~ & ~ flL & R & K) # +,z- . 15 +1z 2# 3E1 45z- #9 !; ' !: 9#=#-9 8#9#-9z- ?#E58 >57 :? 55E E#?,:@E#7,= !; :E#,: :17!-#I +J ~ O@5 * ;# = 975z- = *z- ,z#7,z- ~~~~ 1 ~ & ~ flL & R & K ~ ,z LE,z#:#fl

[3] I & J P H S !, L %) ,z Y! :9 8#=#-9 8#9#-9,5z ,z 9#B917#8 :17!-# : 1; ,z- P -!C57 >;,9#7:I +J ~ 6z9+ ' 8< H!z!> S#=#z5; , ~~~~~ ((1 R (K

[4] I j J P f-H, z- S :!, LE#z- 4 1#, LE!z- ' 19? !9= C!z8 :#=#-95z >57 A!<#;#9 7#=#-5z:971=95z ,z E# !@,,=!95z 5> 8#=#-9 8#9#-95z I +J ~ 6? !-# l z8 O,,:5z L5?@19,z- ~~~~ & ' L1 & R 1 & "

[5] I KJ P f-H, z- S :!, S :# Z1z 4 1!z- ' 19? !9#8 :17!-# :z:#-95z >57 :9!9:q!; 9#B917#:I +J ~ 6? !-# l z8 O,,:5z L5?@19,z- ~~~~ & ' L & R & K

[6] I (J P M!<, ' z#A !-9,<# =5z5 17 ?58#; >57 :E!@# #B9!-9,5zI +J ~ H!E H#9E ' @,; z- , ~~~~~ & L_c fiR ~~~~

[7] I J 邓航 芮雨 石俊 等 用于边缘检测的 Snakes 模型 [J] 上海交通大学学报 ~~~~~ & (flL/1/R /K ~ P#z- 4 lz- M1, Z1' ZE, +lz' #9 !; ' z! "# ? 58#; >57 #8-# 8#-9#-9,5zI +J ~ +517z!; 5> ZE!z-E! , +!59z- /z,C#7;.9D ~~~~~ & 1 (flL/1/R /K ~ ,z LE,z#:#fl

作者简介

乐静女 1981年生 西安理工大学机械与精密仪器工程学院精密系副教授 研究方向为传感器技术和图像检测技术 *? !,;L;#2z-[B119#81" z

郭俊杰 男 1981年生 1997年获天津大学精密仪器系硕士 西安交通大学机械学院教授 博士生导师 长期从事计算机测控技术和坐标测量机的研发工作 *? !;L;2z#[? !,; B21" #81" z

朱虹女 1980年生 日本国立福井大学信息工程学科博士 西安理工大学自动化与信息工程学院教授 博士生导师 从事模式识别和图像信息处理方面的研究 *? !;LGEIE5z-[B119#81" z