

基于小波变换的高精度表面损伤测量

张玉燕^{1,2} 吕坤坤^{1,2} 温银堂³ 王振春³ 战再吉³

¹ 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004
² 燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004
³ 燕山大学科学技术学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 提出了一种基于小波变换的工件表面质量损失检测方法,采用二维激光扫描仪对工件表面进行测量,获取表面形貌信息,将测量到的三维点云数据类比于灰度图像中的像素点云,采用基于小波变换的边缘检测方法,提取工件表面损伤的特征,并对损伤区域进行定位,进而计算工件表面的体积损失及质量损失。针对钢材料工件表面的损伤,进行了检测实验研究。对钢材料表面质量损失检测验证了方案的可行性,实验结果表明待检工件的损伤质量检测精度可达毫克级,可用于大体积或大质量工件的表面损伤测量及材料性能的评估。

关键词 测量;质量损失检测;小波变换;边缘检测;特征区域

中图分类号 TN209 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1208007

High-Precision Measurement of Surface Damage Based on Wavelet Transform

Zhang Yuyan^{1,2} Lü Kunkun^{1,2} Wen Yintang³ Wang Zhenchun³ Zhan Zaiji³

¹ Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China
² Key Lab of Measurement Technology and Instrumentation of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China
³ Institute of Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A method for a workpiece surface mass loss detection is presented based on wavelet transform. In order to obtain the surface morphology information, two-dimensional laser sensor is applied to measure the workpiece. The three-dimensional point cloud data obtained are analogous to the pixel point cloud in the grayscale image. The wavelet transform edge detection method is used to extract and locate the workpiece surface characteristics area and then to calculate the volume loss and mass loss on the surface of the workpiece. The detection experiment is performed for the damage on the surface of the steel material workpiece. The experiment for the steel material workpiece surface mass loss proves the feasibility of the solution. The results show that the tested workpiece damage quality detection accuracy can reach milligram level. The system is suitable for the measurement of big volume or big mass workpiece surface damage and evaluation of the material properties.

Key words measurement; mass loss detection; wavelet transform; edge detection; feature region

OCIS codes 120.4630; 280.4788; 330.1880; 350.1820

1 引言

工件表面损伤和缺陷是影响其质量和使用的重要因素,在设备运作过程中工件之间会存在摩擦损耗。在一些高精密的设备(如航天级器材,汽车耗

材)中材料损耗会影响材料的正常使用和寿命,甚至会对设备正常运作产生不良影响,埋下安全隐患,因此对于工件表面损伤的高精度检测具有重要意义。国内外一些学者致力于这方面的研究^[1-5],提出了

收稿日期: 2014-04-30; **收到修改稿日期**: 2014-06-30

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20111333120009)、河北省自然科学基金(F2012203184)

作者简介: 张玉燕(1976—),女,博士,副教授,主要从事光电检测、光纤传感等方面的研究。

E-mail: yyzhang@ysu.edu.cn

多种表面损伤检测方法。文献[6]提出了基于多重参考模型(MRF)的红外热像表面缺陷检测,红外图像在生成过程中不可避免地受到随机噪声、起伏背景的干扰并伴有热扩散效应,引起图像模糊和边缘扩散;文献[7]用面阵 CCD 采集激光光源照射到钢轨表面的光带图像,并将沿钢轨长度方向和高度方向的深度变化值用深度分布图表示,通过两维图像识别的方法检测缺陷所在的区域,从而实现钢轨表面缺陷的自动检测;文献[8]用基于线阵 CCD 的表面缺陷视觉检测对钢板表面缺陷进行了检测,并且优化设计了视觉检测系统的光学照明部分,实现了对不同类型缺陷的检测;文献[9]提出一种基于预分割轮廓的高精度、高完整性的亚体素表面检测方法,将这种方法应用于涡轮叶片的 CT 图像序列并且将提取结果用于形状分析和精度测试,取得了较好的结果。用于表面损伤检测的方法有很多,但没有形成统一的损伤检测评价标准。目前,基于三维点云数据的工件表面质量损失计算的相关文献未见报道。在精密测试的要求下,对大工件进行高精度的质量损失检测是非常必要的,对工件表面质量损失检测进行了研究,提出了一种基于小波变换的材料表面损伤检测方法,对损伤缺陷的体积及质量进行了测量。

为了更好地获取工件表面体积及质量损失等缺陷信息,减少外界环境的干扰,本文采用二维激光扫描仪对钢工件表面的损伤进行了形貌信息采集,并设计了相应的采集测量系统。激光扫描仪测量到的工件表面形貌信息为三维点云数据,能精确地表示材料表面损伤的细节部分。在进行测量实验时,将激光扫描仪安装在单轴移动定位装置上,对待测工件进行扫描检测,通过大量的测量数据,对所提出的测量方法及有效性进行了实验验证,得到了工件表面的损伤体积和损伤质量。

2 损伤检测原理

2.1 特征提取算法

在工件表面损伤检测过程中,点云数据是检测算法处理的核心数据。工件表面的损伤体现在所获取的形貌信息的变化中,损伤检测就是对工件表面形貌信息中特征区域的定位与提取。在数字图像处理中,边缘检测是指对灰度图像中相邻像素灰度值有变化像素点的检测^[10],这里将边缘检测原理应用于包含工件形貌信息的三维点云数据处理过程之中。所应用的检测方法是基于小波变换的边缘检

测^[11-13]。将点云数据中每一个数据点比作灰度图像中的像素点,点云数据的每一个 Z 坐标值对应一个像素的灰度值,提取工件表面形貌信息中的 Z 坐标(即高度值)构成类似灰度矩阵的数据矩阵。对该矩阵进行边缘检测获取形貌信息中特征区域的轮廓,经实验验证可以很好地检测到损伤缺陷部分(即特征区域)。

在上位机中对获取到的形貌信息进行数据处理,先对数据进行中值滤波,消除脉冲噪声。对滤除完噪声的数据进行 Z 坐标提取,得到矩阵 $f(u, v)$ 。采用小波变换自适应边缘检测算法对数据矩阵 $f(u, v)$ 进行特征区域边缘提取,具体算法如下:

1) 对矩阵 $f(u, v)$ 先与平滑函数做平滑处理再进行小波变换,生成模图像族 $Mf_{2^j}(u, v)$ 和相角图像族 $Af_{2^j}(u, v)$:

$$Mf_{2^j}(u, v) =$$

$$\sqrt{|W^{(1)}f_{2^j}(u, v)|^2 + |W^{(2)}f_{2^j}(u, v)|^2}, \quad (1)$$

$$\tan[Af_{2^j}(u, v)] = \frac{|W^{(2)}f_{2^j}(u, v)|}{|W^{(1)}f_{2^j}(u, v)|}. \quad (2)$$

2) 在模图像族 $Mf_{2^j}(u, v)$ 中寻找沿相角 $Af_{2^j}(u, v)$ 方向的局部模极大值点。保留这些局部模极大值点,而将其他非局部模极大值点的像素均标记为零,得到待选边缘图像 $P_{2^j}(u, v)$ 。

3) 采用 $n \times n$ 的窗口,对待选边缘图像 $P_{2^j}(u, v)$ 进行扫描,根据公式^[14-16] $T = T_0 + A_0 \times C_{i,j}$ 计算自适应阈值 T ,其中 T_0 为初始值, $C_{i,j}$ 为与当前窗口相对应的 Contourlet 变换系数, A_0 为比例系数,反映当前窗口对应的 Contourlet 变换系数对阈值的影响程度。 A_0, T_0 的值可根据实际情况调整。由窗口内的 Contourlet 变换系数求出阈值 T ,图像 $P_{2^j}(u, v)$ 中与窗口相对应的模极大值大于 T 的像素标记为 1,作为边缘点输出;否则,作为非边缘点滤除掉,标记为 0。

4) 移动扫描窗口,依次对可能的边缘图像 $P_{2^j}(u, v)$ 进行扫描,按步骤 3) 求边缘点,直到求出所有的边缘点。

连接所有检测到的边缘点构成边缘图像,即工件表面特征区域的轮廓线。经边缘检测后的矩阵变为二值矩阵,由 0, 1 组成。

2.2 损伤计算

边缘检测之后得到的矩阵由 0, 1 组成,通过图像边缘确定损伤轮廓,进而得到损伤体积。对于特征区域计算损伤体积需要建立基准面,现假设检测完的矩阵大小为 $m \times n$,损伤区域某一列的边缘点坐

标为 $(p, j), (q, j)$, 则该列基准为

$$u_j = (\sum_{i=1}^p \mathbf{Z}_{ij} + \sum_{i=q+1}^m \mathbf{Z}_{ij}) / (m - q + p), \quad (3)$$

损伤体积为

$$V = \sum_{j=1}^n \sum_{i=p}^q (\mathbf{Z}_{ij} - u_j) \times s, \quad (4)$$

损伤质量为

$$m = V \cdot \rho, \quad (5)$$

式中 \mathbf{Z}_{ij} 为第 i 行第 j 列的数据, u_j 为某一列的基准, s 为单个数据点所对应的微元面积, V 为总体积, ρ 为检测材料的密度。

3 测量系统组成及方案

激光扫描测量系统结构框图如图 1 所示, 主要由被测工件夹持装置、二维激光扫描仪、传动装置、数据采集模块及上位机构成。进行实验时, 被测工件固定在夹持装置上, 二维激光扫描仪发出的扫描线只能测到工件表面一条线的 X 值及 Z 值, 在传动装置的带

动下沿 Y 方向移动, 扫描线经过被测工件的表面, 通过数据采集卡采集每时每刻的信号, 获取被测工件表面的三维数据点云。二维激光扫描仪在 Y 方向每 0.1 mm 采集一次数据, 结合数据处理后 X 与 Z 方向的数据精度, 得到点云数据的数据密度约 50000 cm^{-2} 。利用该测量系统可实现对具有大体积或大质量工件的数据采集, 可以获取高精度的工件表面损伤形貌信息, 激光扫描传感器测量到的数据经转换后送入上位机存储, 经数据处理后判断工件表面是否存在损伤及损伤大小。其中二维激光扫描传感器的型号为 ZLDS200, 光源为半导体激光器, 最大功率为 15 mW , 工作波长为 660 nm , 其测量量程为 $80 \sim 115 \text{ mm}$, 扫描线测量长度为 $17 \sim 25 \text{ mm}$, 传感器测量精度 X 方向 $25 \mu\text{m}$, Z 方向 $35 \mu\text{m}$, 传感器采用三角法原理测量距离, 测量的数据基准点在激光发射处, 距离发射处越远获取到的数据值越大。

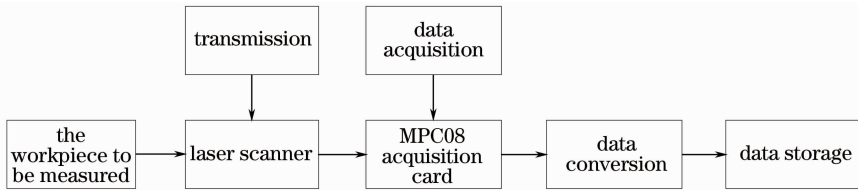


图 1 激光扫描测量系统结构框图

Fig. 1 Laser scanning measuring system structure diagram

利用由二维激光扫描仪、传动装置、数据采集模块及上位机构成的测量系统可对黑体或近似黑体的材料进行测量, 不受外界光线强弱的影响, 可在完全黑暗的条件下测量, 克服了利用 CCD 镜头采集数据等传统方法受光照强度影响的不足, 同样也克服了由于特征区域与背景区域灰度变化不大而无法采用 CCD 采集及检测的不足。本实验所采用的测量系统具有很好的抗干扰性, 得到的数据干扰点很少, 相比于传统的摩擦磨损 (如 CFT-I 型多功能材料表面综合性能测试仪) 测量省时快速。

4 实验结果及分析

在实验室条件下, 利用图 1 所示系统进行测量实验研究。被测工件为钢工件, 表面存在一定的损伤。通过对被测工件表面进行扫描, 所采集到的数据格式如图 2 所示, 每一行对应一个数据点的 X 、 Y 、 Z 坐标, 单位为 mm 。对测量到的数据进行中值滤波、平滑滤波、数据精简, 得到损伤的边缘轮廓。

图 3 为工件损伤的三维模型, 将检测结果与损伤原图进行对比, 并记录实验结果, 如图 4 所示。

1.	718,	78.400,	17.353
1.	743,	78.400,	17.385
1.	767,	78.400,	17.419
1.	790,	78.400,	17.430
1.	814,	78.400,	17.434
1.	837,	78.400,	17.415
1.	862,	78.400,	17.436
1.	888,	78.400,	17.453
1.	910,	78.400,	17.440
1.	935,	78.400,	17.470
1.	958,	78.400,	17.502
1.	982,	78.400,	17.530
2.	007,	78.400,	17.553
2.	034,	78.400,	17.570
2.	060,	78.400,	17.583
2.	086,	78.400,	17.592
2.	112,	78.400,	17.573
2.	136,	78.400,	17.577
2.	162,	78.400,	17.611
2.	190,	78.400,	17.632
2.	217,	78.400,	17.645
2.	243,	78.400,	17.639
2.	267,	78.400,	17.637
2.	293,	78.400,	17.635
2.	319,	78.400,	17.643
2.	347,	78.400,	17.660
2.	374,	78.400,	17.688

图 2 采集到的表面坐标数据

Fig. 2 Surface of coordinate data acquired

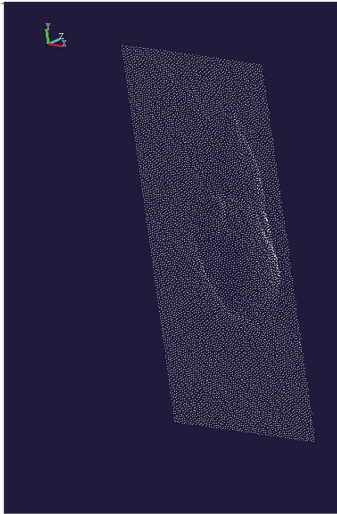


图 3 损伤的三维模型

Fig. 3 Three-dimensional damage model

图 4(a)、(c)、(e)分别是不同位置处的损伤原图,图 4(b)、(d)、(f)分别是对应位置的损伤特征边缘检测结果。由图 4 可知,基于小波变换的边缘检测算法获得的损伤轮廓边缘准确、清晰,并且具有丰富的细节信息,与损伤原图比较可见,所检测的轮廓特征与工件损伤吻合性很好,验证了检测方案的有效性和可行性。由(3)式和(4)式可知,得到每列损伤最外围的坐标即可计算材料表面的体积损失及质量损失。激光扫描仪数据采集时,扫描线长度为 25 mm,扫描线上每两个数据点的间距为 0.02441 mm,采集的数据经简化之后 Z 矩阵的每个数据点对应的微元面积为 0.009765 mm^2 ,具有很高的精密性。测量材料的密度为 7.85 g/cm^3 。表 1 列出了每个位置测量到的损伤体积和质量。

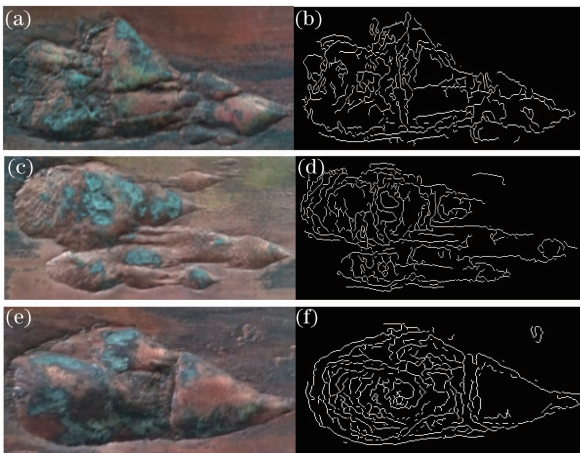


图 4 不同位置处损伤原图与检测结果

Fig. 4 Original damage at different locations and the test results

表 1 不同位置处损伤测量结果

Table 1 Damage measurement results at different locations

	Volume loss /mm ³	Mass loss /g
Fig. 4(a)	85.4185	0.6705
Fig. 4(c)	65.1537	0.5115
Fig. 4(e)	69.1539	0.5429

综合考虑损伤检测原理及激光传感器的技术参数,对于被测工件,表面损伤质量检测精度可达毫克级。若选取更高分辨力的激光扫描传感器或提高边缘检测精度,则能进一步提高损伤质量检测精度。传统测量质量损失的方法(如称重传感器)对于小体积小质量的工件能达到较高的测量精度,对于一些大质量或者大体积的高精密设备或工件,传统测量方法的测量结果将达不到精度要求,本方法能够在满足精度的前提下较好地测量出大体积大质量工件的表面质量损失。

5 结 论

由于材料表面损伤对于材料的安全使用及性能的研究具有重要的意义,针对钢工件表面的微小损伤,研究了基于小波变换的边缘检测方法,设计了相应的测量采集系统,运用二维激光扫描仪采集钢工件表面形貌信息,基于获取到的点云数据精确地计算出了钢带表面损伤的质量。应用此测量系统对表面具有损伤的钢带进行了实验验证,实验表明该系统测量满足高精度工件表面质量损失的检测要求。相比于只能对小工件小区域损伤进行高精度检测的传统方法,该方案适用于大体积大质量工件表面损伤的精确检测,扩展了测量范围,提高了对于大体积大质量工件损伤的检测精度。

参 考 文 献

- Fang Yan, Yang Xichen, Lei Jianbo. Research on shallow spot defect detection based on laser remanufacturing robot[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1203005.
方 艳, 杨洗陈, 雷剑波. 基于激光再制造机器人的表面浅斑缺陷识别研究[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1203005.
- Poullis C. A framework for automatic modeling from point cloud data[J]. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(11): 2563-2575.
- Fang Yan, Yang Xichen. Research on key technology of defect for laser remanufacturing[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0403001.
方 艳, 杨洗陈. 激光再制造中缺陷识别关键技术研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0403001.
- Arbelaez P, Maire M, Fowlkes C, et al.. Contour detection and hierarchical image segmentation[J]. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(5): 898-916.
- Chen Kai, Zhang Da, Zhang Yuansheng. Point cloud data processing method of cavity 3D laser scanner[J]. Acta Optica

- Sinica, 2013, 33(8): 0812003.
- 陈凯, 张达, 张元生. 采空区三维激光扫描点云数据处理方法[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812003.
- 6 Xie Jing, Xu Changhang, Chen Guoming. An infrared thermo image processing framework based on MRF model to detection surface defect on a metal element[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(11): 20-24.
- 谢静, 徐长航, 陈国明. 基于MRF模型的金属工件红外热像表面缺陷检测[J]. 石油矿场机械, 2013, 41(11): 20-24.
- 7 Xu Ke, Yang Chaolin, Zhou Peng, *et al.*. 3D detection technique of surface defects for steel rails based on linear lasers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, (8): 1-5.
- 徐科, 杨朝霖, 周鹏, 等. 基于激光光源的钢轨表面缺陷三维检测方法[J]. 机械工程学报, 2010, (8): 1-5.
- 8 Zhang Hongtao, Duan Fajie, Ding Keqin, *et al.*. Development of key technology on surface defects detection system for steel strip[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(3): 216-219.
- 张洪涛, 段发阶, 丁克勤, 等. 带钢表面缺陷视觉检测系统关键技术研究[J]. 计量学报, 2007, 28(3): 216-219.
- 9 Zha Fanglong, Zhang Dinghua, Huang Kuidong, *et al.*. Subvoxel-accuracy surface detection method based on contour pre-segmentation for computed tomography images [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1308-1314.
- 查方龙, 张定华, 黄魁东, 等. 基于预分割轮廓的CT图像亚体素表面检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1308-1314.
- 10 Berlemont S, Olivo-Marin J C. Combining local filtering and multiscale analysis for edge, ridge, and curvilinear objects detection[J]. IEEE Image Processing, 2010, 19(1): 74-84.
- 11 Vigneshwaran B, Maheswari R V, Subburaj P. An improved threshold estimation technique for partial discharge signal denoising using wavelet transform [C]. Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2013. 300-305.
- 12 Zhao Mingbo, He Jun, Tian Junsheng, *et al.*. Ladar data filtering method based on improved progressive multi-scale mathematic morphology[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0328001.
- 赵明波, 何峻, 田军生, 等. 基于改进的渐进多尺度数学形态学的激光雷达数据滤波方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0328001.
- 13 Sen D, Pal S K. Gradient histogram: thresholding in a region of interest for edge detection[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(4): 677-695.
- 14 Liu Kun, Guo Lei, Chang Weiwei. Regional feature self-adaptive image fusion algorithm based on contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 681-686.
- 刘坤, 郭雷, 常威威. 基于Contourlet变换的区域特征自适应图像融合算法[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 681-686.
- 15 Wu Yiquan, Yin Jun. Reconstructed image enhancement of digital holography in contourlet domain based on particle swarm optimization[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0809002.
- 吴一全, 殷骏. 粒子群优化的Contourlet域数字全息再现像增强[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809002.
- 16 Lin Liyu, Zhang Longyan. Contourlet Transform: Image Processing Applications[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- 林立宇, 张龙焱. Contourlet变换: 影像处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

栏目编辑:何卓铭