

# 基于机器视觉的齿面点蚀面积特征提取的研究

俞莎莎,朱如鹏,李苗苗,陈健,解超

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**在齿轮接触疲劳试验中,需要定期检查齿面点蚀状况。提出了一种基于机器视觉的齿面点蚀面积特征提取方法。针对试验齿轮箱空间窄,会使获得的齿面点蚀图像曝光不足或过度而使图像在获取、传输过程中产生噪声的问题,利用基于遗传算法的图像增强操作突出点蚀区域,抑制其他区域,并利用中值滤波及小波变换去除图像中的噪声,再将获得的图像进行分割、面积特征提取,最终通过实例验证了该方法能够准确、快速、有效地获取齿面点蚀面积,并利用 Matlab 图形界面(GUI)实现了机器视觉处理算法集成和交互可视化功能,为用户快速获取点蚀区域面积提供了便利。

**关键词:**齿轮;接触疲劳试验;齿面点蚀;特征提取;图像;GUI

**中图分类号:**TH132.41 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)01-0087-04

## Research on Extraction of Pitting Area Feature Based on Machine Vision

YU Shasha, ZHU Rupeng, LI Miaomiao, CHEN Jian, XIE Chao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In gear contact fatigue test, it is necessary to regularly check the pitting of tooth surfaces. A method of feature extraction of pitting area of this surface based on machine vision is proposed. Due to the narrow space of the gearbox, it results in insufficient or excessive exposure of the pitting image and noise in the process of acquisition and transmission. The image enhancement operation based on genetic algorithm is used to highlight the pitting area and restrain other areas and the noise in the image is removed by median filtering and wavelet transformation, then, the obtained image is segmented and the area feature is extracted. The example is used to verify that the method which can be used to obtain the pitting area of the tooth surface accurately, quickly and effectively. The graphical interface (GUI) developed by using MATLAB can be used to realize the integration of the machine vision processing algorithm and interactive visualization. It is convenient for users to quickly obtain the area of pitting area.

**Keywords:** gear; contact fatigue test; tooth surface pitting; feature extraction; image; GUI

## 0 引言

齿轮点蚀失效意味着齿轮接触疲劳试验的终止<sup>[1]</sup>,对于点蚀失效齿面有很多传统的观测、计量方法,如根据目视判断点蚀情况、铅印法、直接塑造法、轮齿断面观测法等。但上述方法易受观测设备的限制,操作过程繁杂,费事费力。机器视觉<sup>[2]</sup>作为一门学科产生于20世纪60年代,现已得到了广泛的应用。目前,计算机视觉应用主要基于二维图像的特征提取<sup>[3]</sup>、识别、检测与匹配<sup>[4]</sup>等。面积是物体主要的二维特征之一,对于一些大尺寸物体和人类无法感知场合的物体进行实际面积测量时,普通的测量工具无法完成的测量工作,计算机视觉更显示出其无可比拟的优越性<sup>[5]</sup>。在已有的文献中,张金瑞<sup>[6]</sup>利用机器视觉技术提取树叶面积特征。吕威兴<sup>[7]</sup>利用机器视觉技术提取出激光致金属蒸汽图像的面积与高度特征参量。李红钢<sup>[8]</sup>利用机器视觉检测技术,开发了一套某型药筒零

件难测量尺寸的测量系统,该系统在某型药筒零件难测量尺寸的在线检测上得到成功应用,并且通过相应的试验分析,验证了机器视觉检测系统性能的优越性。

由于机器视觉技术在特征提取方面有着快速、准确的特点,本文提出了一种基于机器视觉的齿面点蚀面积特征提取方法。相对于一般图像面积特征提取方法,该方法考虑试验齿轮箱空间窄,会使获得的齿面点蚀图像曝光不足或过度以及图像在获取、传输过程中会产生噪声,提出首先利用基于遗传算法的图像增强操作突出点蚀区域,抑制其他区域,并利用中值滤波及小波变换去除图像中的噪声,然后再将获得的图像进行分割、面积特征提取,从而提高准确性。最后,通过实例验证了该计算方法能够准确、快速、有效地获取齿面点蚀面积,并可判断试验是否继续。

MATLAB语言有着突出的特点。它不仅拥有高性能数值计算能力,而且能够开发出界面友好、使用方便的图形界面,在系统仿真和图像处理模型研究中具有广泛的应用<sup>[9]</sup>。为了便于操作,本文充分利用了 Matlab 的图形

基金项目:国家自然科学基金(51775265)

第一作者简介:俞莎莎(1990—),女,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事基于在线油液磨粒监测的齿轮箱故障预测研究。

用户界面环境(GUI)中各种图形对象,如按钮、文本框、菜单、图轴等控件,通过鼠标拖入控件来创建控件对象,编写相应回调函数实现图像处理的算法集成和交互可视化功能,为用户快速获取点蚀区域面积提供了便利。

## 1 基于机器视觉的齿面点蚀面积特征提取算法

根据分析可知,点蚀图像可以分为点蚀区域、噪声区域和齿面区域三部分。齿面区域的灰度值最高,点蚀区域的灰度值最低,而噪声区域的灰度值则介于两者之间。齿面点蚀图像处理的目的是重点突出点蚀区域,消除噪声区域,将噪声区域和齿面区域同化为背景区域。最后将获得的图像进行分割,对点蚀区域面积特征进行提取。

### 1.1 基于遗传算法的图像增强

在图像处理中一般先将各种格式的图像转变成灰度图像以使后续图像的计算量变得少一些,而转化后的灰度图像仍然保留了原先对比度不足的弊端。文献[10]提出采用三段线性变换法来修正灰度图像,扩大对比度从而达到图像增强的目的,其数学表达式为式(1):

$$f1(x,y) = \begin{cases} \frac{c}{a}f(x,y) & 0 \leq f(x,y) < a \\ \frac{(d-c)(f(x,y)-a)}{b-a} + c & a \leq f(x,y) \leq b \\ \frac{(255-d)(f(x,y)-a)}{255-b} + d & b < f(x,y) \leq 255 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(x,y)$ 是灰度图像矩阵中坐标为 $(x,y)$ 的像素点的灰度值; $f1(x,y)$ 为该像素点经过分段线性变换后的灰度值。其中分段点 $a,b,c,d$ 的值由人工设置,需要经历多次反复的实验,故很难达到最佳的增强效果。

本文在此基础上提出一种采用遗传算法的图像增强操作,用遗传算法自动选择2个折线拐点的位置,即采用遗传算法自适应确定点 $a,b,c,d$ 的值,得到最优的分段线性变换曲线,从而实现图像增强处理。

#### a) 图像增强算法的设计

1) 问题重述,根据点蚀图像特点可知,当灰度值 $>b$ 时应为背景区域,故取 $d=255$ ,要优化目标变为 $a,b,c$ 的值,此外 $a,b,c$ 值应满足如下约束: $0 < c \leq a < b < 255$ ,这样问题就转化为求解带约束的多参数优化问题;

2) 编码设计,一条染色体采用3元数组 $(a,b,c)$ 表示,每一个参数对应10个基因位,采用二进制编码;

3) 适应度函数设计,采用图像质量评价函数作为个体适应度函数,如下式所示:

$$Fit(i) = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x,y))^2 - \left[ \frac{1}{n} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y) \right]^2 \quad (2)$$

式中 $Fit$ 为个体适应度函数,反映的是图像中各个像素的灰度值与整个图像平均灰度值的离散程度, $f(x,y)$ 为图像灰度值, $n=M \times N$ , $i$ 表示个体。

4) 遗传算子设计,采用基于精英选择策略的选择算

子、单点交叉算子、离散变异算子进行遗传操作;

5) 算法结束条件,算法的迭代次数达到最大进化代数。

#### b) 算法具体实现步骤

1) 首先设定种群规模、遗传算法的交叉概率、变异概率、代沟以及最大进化代数;

2) 对待优化目标 $a,b,c$ 进行二进制编码并产生满足约束条件的初始种群;

3) 采用式(1)对灰度图像 $f(x,y)$ 进行变换,得到 $f1(x,y)$ ;

4) 根据式(2)个体适应度函数计算个体适应度;

5) 对种群进行选择、交叉和变异操作,产生新的种群,不断重复步骤3)、步骤4)、步骤5);

6) 结束条件判断。如果达到最大进化代数或是获得较优的个体,把当前适应度值最大的个体作为最优解输出,对最优个体进行反编码,得到最优参数 $a,b,c$ ;

7) 将最优参数 $a,b,c$ 代入到式(1)中,得到图像增强的最优结果,增强后的图像为 $f_{st}(x,y)$ 。

### 1.2 基于中值滤波及小波变换的图像去噪

增强后的点蚀图像 $f_{st}(x,y)$ 中含有噪声,对大多数机器视觉应用系统来讲,噪声主要来自加性的椒盐噪声和高斯噪声。中值滤波对椒盐噪声具有良好的抑制作用,并能较好地保护图像边缘,但对高斯噪声的效果不佳;小波阈值去噪对高斯噪声的去除有较好的效果<sup>[12-13]</sup>。因此本文采用中值滤波与小波变换相结合的去噪方法,对点蚀图像中混合噪声进行分别去除,算法思路为:对 $f_{st}(x,y)$ 进行中值滤波、小波分解、阈值处理、小波重构,最终获得去噪后的图像 $f_{dn}(x,y)$ 。

### 1.3 点蚀图像分割与二值化

为了将点蚀区域从图像中提取出来,采用最大类间、类内方差比法确定二值图像的分割阈值 $th$ 。确定该分割阈值之后,将小于分割阈值的灰度值置为0,大于分割阈值的灰度值置为1,即使点蚀区域为黑色,背景区域为白色,从而实现灰度图像到二值图像的图像分割。

$$bw(x,y) = \begin{cases} 0 & f_{dn}(x,y) \leq th \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $bw(x,y)$ 为分割后的二值图像; $f_{dn}(x,y)$ 为去噪后的图像。

### 1.4 点蚀图像的面积特征提取

点蚀区域面积计算公式为:

$$A_{\text{real}} = A \times (b/N_b)^2 \quad (4)$$

式中: $b$ 为齿宽; $N_b$ 为图像中齿宽方向的像素数; $A$ 为所有连通区域总像素数; $A_{\text{real}}$ 为实际点蚀面积,单位 $\text{mm}^2$ 。

点蚀区域进行特征提取步骤如下:

1) 通过形态学运算去除二值图像点噪声,结构元素使用半径为3mm的圆盘。接着对目标区域内部空洞填充;

2) 对不同连通区域进行标记,像素的连通性设定为8;

3) 对加有标记的各区域像素数进行提取,并将提取的各区域像素数进行求和,计算出所有连通区域总像素数;

4) 利用式(4)计算实际点蚀面积。

### 1.5 GUI 设计

为了便于操作,提高试验效率,本文利用 Matlab 开发出界面友好、使用方便的图形界面(GUI),以实现机器视觉处理算法集成和交互可视化功能,如图1所示。



图1 基于机器视觉单齿点蚀面积率计算 GUI 界面

首先在齿轮齿面输入参数模块的齿宽文本框中输入需要提取点蚀面积的齿轮齿宽参数,然后依次单击“加载点蚀图像”按钮、“灰度化”按钮、“图像增强”按钮、“图像去噪”按钮、“特征提取”按钮,软件便可对点蚀图像进行相应处理,并在界面上方给出该操作结束后点蚀机器视觉结果。在总像素数及点蚀区域面积对应的文本框中给出相应的数值结果,据此可判断齿轮是否疲劳点蚀破坏。

## 2 算法应用

### 2.1 齿面点蚀灰度图像获取

在试验过程中,需要以一定时间间隔停机检查齿面,用 CCD 摄像头采集齿面的数字图像,在拍摄时需将齿宽完整地拍摄进图像之中。对所拍摄的图像运用本文提出的基于机器视觉方法提取其面积特征。图2为任选一个点蚀齿面图,将其放大 100 倍并经灰度变换得到的图像。



图2 放大 100 倍后单个齿面点蚀灰度图

### 2.2 齿面点蚀面积特征提取

利用遗传算法对图2中的齿面点蚀灰度图进行增强操作,设定遗传算法初始参数如下:种群规模为 40 个,交叉和变异概率分别为 0.7 和 0.01;最大进化代数数为 50,代沟 0.95,试验得到的增强效果图如图3所示。对比变换前图和变换后图可以看出,变换后点蚀区域(低灰度区)与齿面背景(高灰度区)被明显地分离开来。

利用中值滤波及小波变换去除图3中所含的椒盐和

高斯混合噪声,设置滤波器参数:中值滤波器采用 3×3 窗口,小波滤波器采用 db4 小波基进行 3 层分解, Birge - Massart 算法获取各层阈值,对软阈值函数进行处理。试验结果如图4所示。从图4中可观察到,一些离散孤立的噪声点被去除。

再采用最大类间、类内方差比法分割图4,分割后的二值图像如图5所示。从图5中可观察到,点蚀区域和齿面背景截然分开,且分离较为准确。

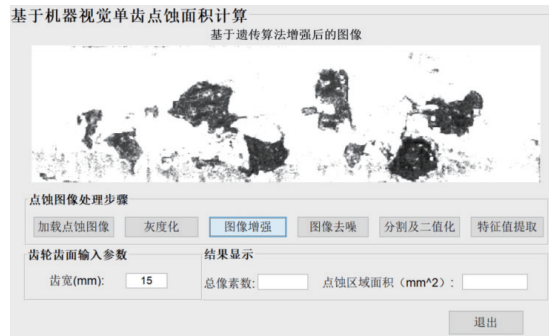


图3 基于遗传算法图像增强后的灰度图



图4 消除椒盐和高斯混合噪声后的灰度图



图5 点蚀图像分割后的二值图像

最后再提取点蚀图像的面积特征。可观察到,点蚀区域内部的孔洞(孔噪声)被填充,而一些面积特别小的区域(点噪声)被去除。此外,还将不同的点蚀区域进行了标记,让每个单独的连通区域形成一个被标识的块。点蚀图像点噪声、孔噪声去除后连通区域标记图像如图6所示。输入齿轮齿面参数齿宽  $b = 15$  mm,该齿面点蚀区域可分为 10 个连通区域,各连通区域总像素数为 47343 个。仿真结果表明:该齿面实际点蚀面积为  $15.7076 \text{ mm}^2$ 。

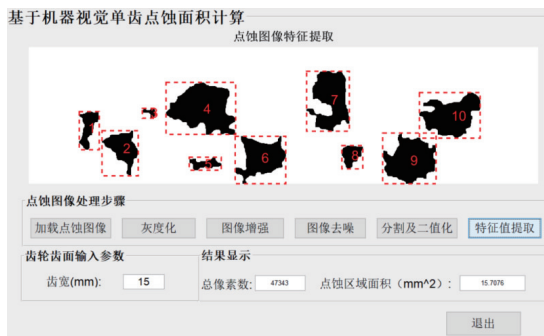


图6 点蚀图像连通区域标记图

### 3 结语

齿面点蚀面积是判断试件是否点蚀失效的判据,本文通过对齿轮点蚀照片特点的分析,研究了通过机器视觉提取点蚀面积信息的方法。相对于铅印法、人眼观察等传统方法,采用数字机器视觉方法,能够快速、方便、经济地获得齿面的点蚀面积信息,判断试验是否可以继续。本文利用 Matlab 开发出界面友好、使用方便的图形界面(GUI),使操作人员不需对机器视觉和 Matlab 知识有了解便可轻松获取点蚀面积,大大提高了试验效率。

#### 参考文献:

[1] GB/T 14229-1993 齿轮接触疲劳强度试验方法[S].

- [2] WESLEY E. Snyder and Hairong Qi, Machine vision [M]. [S.I.]: China Machine Press, 2005:1-2.
- [3] 吴禄慎,万超,张丛. 轨道扣件检测特征提取算法研究[J]. 机械设计与制造, 2018(8):5-7.
- [4] 林玉玲,韩国强. 基于图像配准的扫描电镜图像误差校正[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6):96-99.
- [5] A.Soini. Machine vision technology take-up in industrial applications [J]. Image and Signal Processing and Analysis, 2001:332-338.
- [6] 张金瑞. 基于机器视觉的树叶面积特征提取的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2010.
- [7] 吕威兴. 大功率碟型激光焊金属蒸汽图像特征分析[D]. 广州:广东工业大学, 2011.
- [8] 李红钢. 基于机器视觉的某型药筒零件难测量尺寸测量系统研究[D]. 太原:中北大学, 2014.
- [9] 邢文博,蒋敬. 基于 Matlab 开发数字图像处理 GUI[J]. 电气电子教学学报, 2013, 35(6):107-108, 115.
- [10] 张秀君,孙晓丽. 分段线性变换增强的自适应方法[J]. 电子科技, 2005(3):13-16.
- [11] 刘江林. 基于小波变换的雷达机器视觉技术及仿真[J]. 舰船科学, 2015, 37(4):211-214.
- [12] DONG wookCho, TIEN D Bui. Multivariate statistical modeling for image denoising using wavelet transforms [J]. Signal Processing Image Communication, 2005, 20:77-89.

收稿日期:2018-10-23

(上接第 77 页)

2) 随着间隙误差的增加,瞬时流量差值的平均值越大,且对比其他部位间隙误差对系统流量脉动的影响,连杆大头和曲轴曲柄之间转动副径向间隙误差对流量脉动影响最大。

3) 间隙误差对系统流量脉动影响明显,因此,需要对机构间隙进行进一步合理设计,减小间隙误差,以保证零部件以及系统使用的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 张洪信,张铁柱,霍炜,等. 液压约束活塞发动机能量平衡分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):36-39.
- [2] 张洪信,戴作强,张翼,等. 轴向液压约束活塞发动机工作原理与运转平稳性[J]. 中国机械工程, 2006, 17(5):529-532.
- [3] ZHANG Hongxin, ZHANG Tiezhu, WANG Weichao. Influence of valve's characteristic on total performance of three cylinders internal combustion water pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1):91-96.
- [4] 赵红,张铁柱,张洪信,等. 三缸内燃式水泵的动力学建模和外特性仿真[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3):114-118.
- [5] 张铁柱,张洪信,张继忠,等. 工程机械的未来动力源——机械-液压二元动力系统[J]. 中国工程机械学报, 2005, 3(3):262-266.
- [6] 郭哲锋. 液压支架机构运动精度可靠性的分析与仿真[D]. 郑州:郑州大学, 2011.
- [7] MANOLIS Papadrakakis, NIKOS D Lagaros. Reliability-based

structural optimization using neural networks and monte carlo simulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(32):34-91.

- [8] Di Sciuva M, LOMARIO D. A comparison between Monte Carlo and FORMs calculating the reliability of a composite structure [J]. Composite Structures, 2003, 59(1):155-162.
- [9] MAINAK Mazumdar, DAVID W Coit, KELVIN Me Bride. A highly efficient Monte Carlo method for assessment of system reliability based on a Markov model[J]. Quality Control and Applied Statistics, 2001, 46(1):109-112.
- [10] 纪玉杰. 机构动作可靠性仿真技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2006.
- [11] 宋黎,曹惟庆,褚金奎. 间隙曲柄滑块机构运动误差分析的模拟实验修正法[J]. 机械设计, 1999, 16(4):37-40.
- [12] 陆凤仪,孙占营,徐格宁. 基于杆组理论的连杆机构运动精度及运动仿真研究[J]. 太原科技大学学报, 2003, 24(1):57-61.
- [13] 陈建军,陈勇. 平面四杆机构运动精度可靠性分析与数字仿真[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2001, 28(6):759-764.
- [14] 武丽梅,耿华. 基于 ADAMS 的曲柄摇杆机构的运动精度仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2006(10):9-11.
- [15] 周毓明,赵竹青. 平面凸轮机构运动精度可靠性分析与数字仿真[J]. 机械设计, 2005, 22(1):48-50.

收稿日期:2018-09-10