

采用自适应区域生长的微型 钻铣刀具磨损检测方法

邓晓鹏, 王妍, 洪煜, 胡小锋
(上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海)

摘要: 针对微型钻头与微型铣刀磨损图像中干扰严重、磨损区域自动识别困难以及磨损量测量不准确等问题,融合最大类间方差法与区域生长算法,提出一种基于自适应区域生长的刀具磨损视觉检测方法。首先通过最大类间方差(Otsu)算法自动裁剪磨损图像,结合图像像素变化规律确定区域生长起点与初始阈值,并以类间方差为依据进行阈值更新,获得磨损区域二值图像。在此基础上,通过最小二乘法对刀具轮廓线进行重构,实现刀具磨损量的自动测量。最后,通过磨损测量数据的一致性分析验证算法的有效性。结果表明:所提方法测量结果与人工测量结果具有较强的一致性;相较于目前已有的机器视觉检测方法,该方法可以有效避免刀体干扰区域的影响,准确提取微型钻铣刀具的磨损信息,可以精准实现对微型钻铣刀具磨损状态的检测。

关键词: 微型钻铣刀具;自适应区域生长;自动测量;一致性分析

中图分类号: TG71;TP391.41 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202112012 **文章编号:** 0253-987X(2021)12-0098-10



Wear Detection for Micro-Drill and Micro-Milling Tool via Adaptive Region Growth Algorithm

DENG Xiaopeng, WANG Yan, HONG Yu, HU Xiaofeng
(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the problems, such as serious interference, difficulty in automatic identification of wear region and inaccurate measurement of wear quantity in micro drill and micro milling tool wear images, a visual detection method for tool wear based on adaptive region growth is proposed by combining the maximum inter-class variance method with the region growing algorithm, where the wear image is automatically trimmed by Otsu algorithm, and the starting point and initial threshold of region growth are determined according to the change rule of image pixels. The threshold is updated according to the inter-class variance to obtain the binary image of the wear area. Then the tool contour is reconstructed by least square method, and automatic measurement of tool wear is realized. The consistency analysis of wear measurement data is performed to verify the effectiveness of the proposed algorithm. It is indicated that the measurement results from the proposed method coincide well with the manual measurement results. Compared with the existing machine vision detection methods, this method can effectively avoid the influence of the interference area, and accurately extract the wear information of the micro drill and micro milling tool, thereby accurately realizing the detection of

the wear state of the micro drill and micro milling tool.

Keywords: micro drill and micro milling tool; adaptive region growth; automatic measurement; consistency analysis

作为数控机床的重要组成部分,刀具状态直接影响工件的加工质量与精度。加工过程中,过早更换刀具造成资源浪费,增加生产成本;过晚更换刀具则易造成零件质量下降。研究表明,刀具的不合理使用对工业生产造成的影响高达 100 亿美元^[1]。尤其是在航空制造领域,大量使用微型刀具,零件加工精度要求高,刀具价格昂贵。通过刀具状态检测严格控制换刀时间,对降低生产成本、保证加工质量具有重要意义^[2]。

根据测量方式的不同,刀具磨损状态检测方法可分为间接法与直接法两类^[3]。间接法通过测量与刀具磨损相关的中间变量来描述刀具磨损状态,例如切削力^[4]、声发射^[5]、电机电流^[6]、切削温度等信号^[7-8]。其流程为:对加工过程中的传感器信号进行特征提取等处理,得到与刀具磨损相关的特征量,在此基础上构建特征信号与刀具磨损之间的关系模型^[9]。间接法可实现刀具状态的实时检测,但传感器采集的过程信号易受外界噪声干扰,在一些信号特征不明显的加工中可能不可用^[10]。

直接法以刀具本身为检测目标,主要有光学检测法以及基于机器视觉的检测法^[11]。基于机器视觉的检测方法通过对刀具磨损图像进行处理来获取刀具磨损信息。随着制造工艺与视觉检测技术的进步,基于机器视觉的刀具磨损检测方法得到了很大发展。Pfeifer 等提出一种基于多光源和多刀具图像采集的磨损检测系统,利用不同光源下的多幅刀具图像重构磨损区域,增强刀具磨损边缘,进而提取磨损区域^[12]。朱爱斌等采用非标定双目视觉方法对刀具磨损轮廓进行了重构^[13]。Sortino 提出了一种基于统计滤波的刀具磨损区域检测定向算法,通过比较图像行、列像素值的变化来提取磨损带边界^[14]。Jamie Loizou 等通过自动切割与一系列图像处理算法提取拉刀的磨损带,依据图像像素变化特点裁剪感兴趣区域,通过 Otsu 算法对图像进行阈值分割,得到刀具磨损区域的二值图像^[15]。叶祖坤等采用局部阈值分割方法自动识别刀具磨损带位置,进而对刀具磨损量进行提取^[16]。

以上方法所针对的刀具图像中干扰因素较少。但是,微型刀具磨损图像是在多倍放大后获得的,在放大磨损区域的同时也会放大刀体条纹,条纹以及

刀体未磨损区域的反光都会对磨损位置的确定造成影响,使得上述方法不再适用。

因此,本文结合微型刀具磨损图像特点,提出一种基于自适应区域生长的刀具磨损检测方法,通过图像裁剪、磨损区域提取、磨损边界重构等过程,实现微型刀具磨损信息的自动提取。

1 刀具磨损图像采集装置

航空制造中微型刀具直径一般小于 1 mm,为获取可反映刀具磨损状态的刀具图像,本文选用图 1 所示的装置对微型钻铣刀具进行离线图像采集。该装置由显示器、显微镜以及磁性 V 型块 3 部分组成。显微镜为 BETICAI CR40-930HD 三目工业检测正置金相显微镜,放大倍数分别为 350、1 400、2 100 倍,分辨率为 1 920×1 080 像素。在图像采集过程中,首先将钻铣刀具吸附在竖直放置的磁性 V 型块上,通过显微镜观察刀具底面刀刃,测得底刃偏转角度 α ,旋转刀具使底面刀刃边缘水平,即图 2 中 $\alpha=0^\circ$,实现刀具定位;再将磁性 V 型块连同刀具水平放置,对钻铣刀具的侧刃磨损区域进行拍摄。刀具定位原理如图 2 所示^[17]。采集完成后,以同样的



图 1 图像采集装置

Fig. 1 Image acquisition device

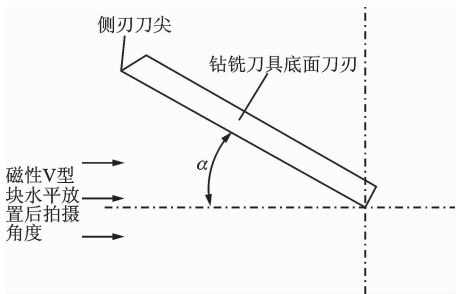


图 2 刀具定位原理图

Fig. 2 Schematic diagram of tool positioning

方式获取另一刀刃的磨损图像。

2 刀具磨损检测方法

本文提出的刀具磨损检测方法的具体流程如图 3 所示,通过图像预处理、图像自动裁剪、图像二值化以及磨损边界重构等过程实现刀具磨损信息的精确提取。

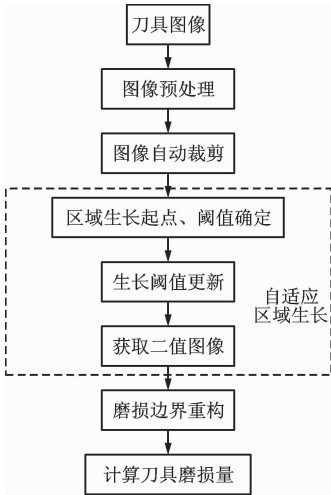


图 3 刀具磨损检测流程
Fig. 3 Tool wear detection process

2.1 图像预处理

通过图像采集装置得到的刀具磨损图像中存在许多噪声,这些干扰点会影响后续刀具磨损带的提取。因此,在进行刀具磨损带提取前,采用双边滤波算法对原始图像进行滤波处理,去除图像中的噪声。双边滤波综合考虑像素的欧氏距离与像素范围域中的辐射差异,可以在降噪平滑的同时保持原始边缘。同时,为降低后续图像处理的复杂度,对刀具图像进行灰度化处理。

2.2 图像自动裁剪

刀具磨损图像主要包括刀体区与背景区两部分。背景区在原始图像中占很大比例,但其几乎不含有用信息。直接在原始图像上进行处理会导致时间复杂度上升,且图片中多余的信息会干扰后续磨损量的提取。因此,对图像进行自动裁剪操作,实现感兴趣区域(ROI)的提取。

刀体反光以及条纹的影响,使得刀体区内存在许多干扰区域,与磨损区域具有相似的像素特征。但背景区像素单一,与刀体内部的高亮区域存在明显对比。因此,本文首先通过频率调谐(FT)显著性检测算法^[18]凸显刀体内部干扰区域与磨损区域,其次采用最大类间方差(Otsu)算法将图像分为两部

分,进而确定 ROI 坐标范围,实现 ROI 的自动提取。

FT 显著性检测算法利用图像颜色与亮度特征提取视场中的显著区域,通常在 Lab 色彩空间进行处理,考虑到刀具图像的单一性,此处直接在灰度图像上进行处理。处理后的图像如图 4 所示。当磨损区域亮度较低时,该算法会凸显整个刀体区域。为体现算法对不同图像处理结果的差异,用不同特点的图像进行了实验。

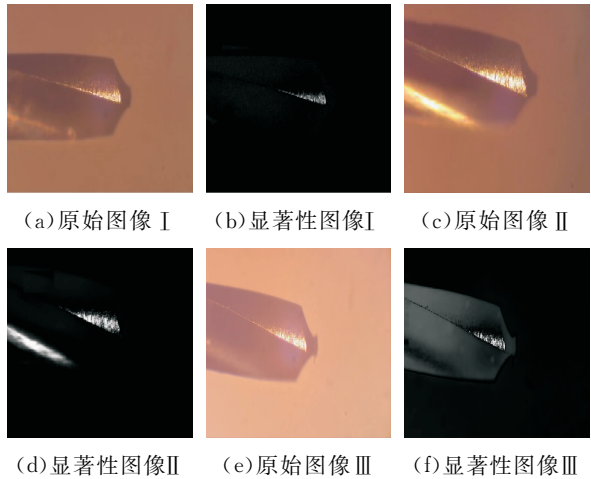
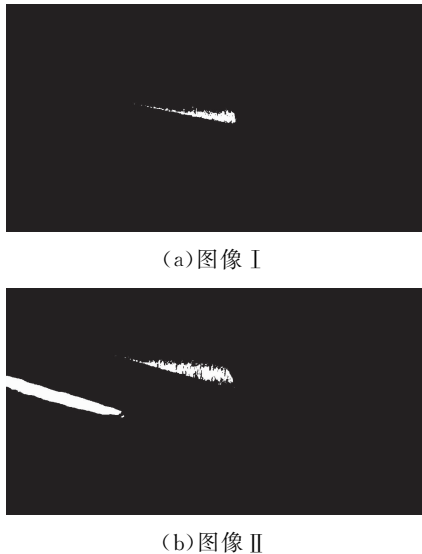


图 4 显著性检测后图像
Fig. 4 Images after significance detection

刀具图像的显著区域位于刀体内部,通过 Otsu 算法选择合适的阈值对显著性图像进行二值化处理,将图像分割为刀体内部区域与其他区域两部分,如图 5 所示。显著性检测后,磨损区域与干扰区域的亮度得到增强,因此二值化处理后高像素值区域包含磨损区。通过提取高像素值点的横、纵坐标极值,得到包含所有高像素值点的最小矩形,并以此为界限对图像进行裁剪,得到图 6 所示的 ROI 图像。





(c)图像Ⅲ

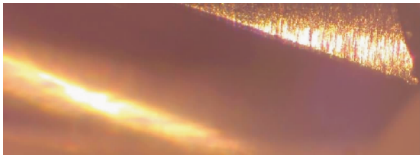
图 5 二值化处理后的图像

Fig. 5 Images after binarization processing

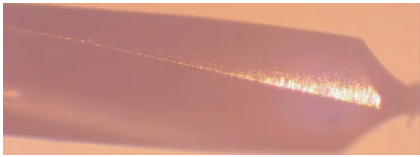
由于裁剪过程中同时对磨损区与干扰区进行了凸显,两区域坐标范围存在重叠,因此裁剪后的图像包含干扰区、磨损区以及平滑刀体区 3 部分。



(a)图像 I



(b)图像Ⅱ



(c)图像Ⅲ

图 6 感兴趣区域图像

Fig. 6 Images of interesting regions

2.3 基于区域生长算法的刀具磨损区域提取

区域生长算法的基本思想是将有相似性质的像素点合并到一起。从目标区域选择一个种子点作为生长起点,将种子点与其邻域内符合生长条件的像素点合并。并入的点作为新的种子点继续向外生长,直至不再有符合生长条件的点加入。该算法的关键在于确定生长起点与生长条件^[19]。

宋红等提出一种基于动态自适应区域生长的肝脏 CT 肿瘤分割算法,通过对预处理图像进行预分割得到 ROI,利用形态学滤波填充空洞获取肝脏区域^[20],但其中种子点的选取需要人为参与。李姗姗等提出一种基于区域生长的刀具磨损检测方法,选择二值化图像中白块区域的质心为生长起点,并通过质心所在位置自动确定生长阈值,实现了刀具磨损的自动提取^[21]。但是,通过质心选取生长起点易

受干扰区域影响,导致磨损带提取不准确。考虑到磨损区域封闭、连通的特点,本文提出图 7 所示的自适应区域生长算法对磨损区域进行提取。

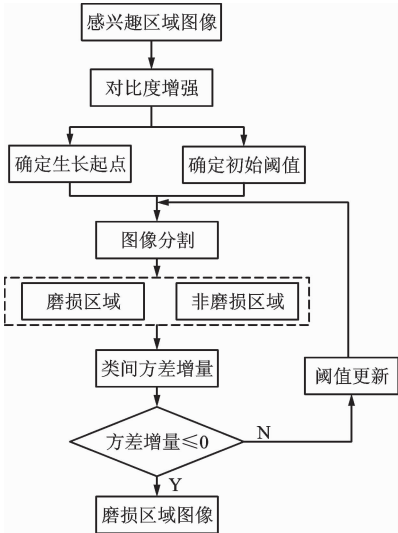


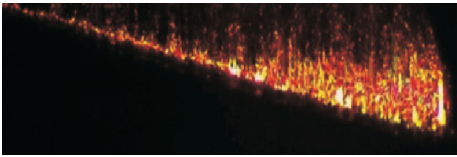
图 7 基于自适应区域生长的磨损区域提取流程

Fig. 7 Wear area extraction process using adaptive region growth algorithm

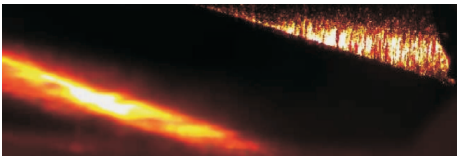
图像对比度增强是指通过一定方法改变图像像素以改善图像效果,抑制无用信息,提高图像使用价值。此处选择伽马变换对图像进行增强^[22],相应的增强公式为

$$f(I) = I^r$$
 (1)

式中: $f(I)$ 为增强后像素; I 为原始像素; r 为可调参数,影响增强效果。增强后结果如图 8 所示。



(a)图像 I



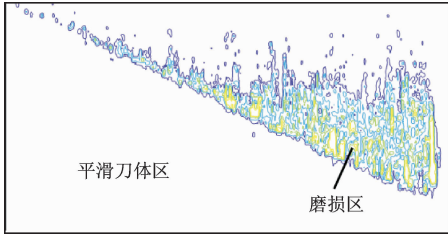
(b)图像Ⅱ

图 8 对比度增强后图像

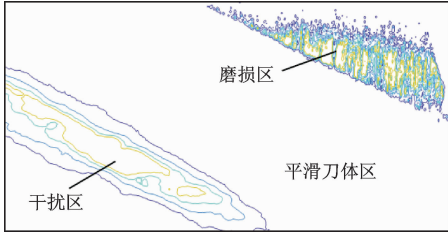
Fig. 8 Contrast-enhanced image

结合图 9 所示的刀具图像等高线分布对 ROI 图像各区域特点进行分析。磨损区域亮度整体高于平滑刀体区,其内部存在纹理干扰。干扰区指反光区域,与磨损区相比,干扰区亮度更大但像素分布均

匀,内部纹理特征不明显,但也有部分刀具图像有明显的干扰区。



(a) 图像 I



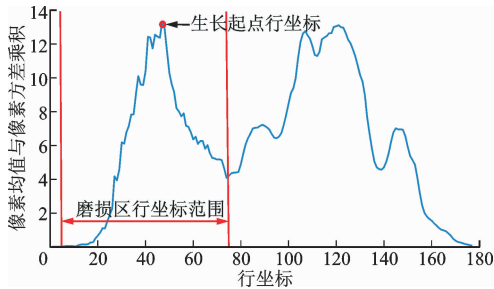
(b) 图像 II

图 9 等高线分布图像

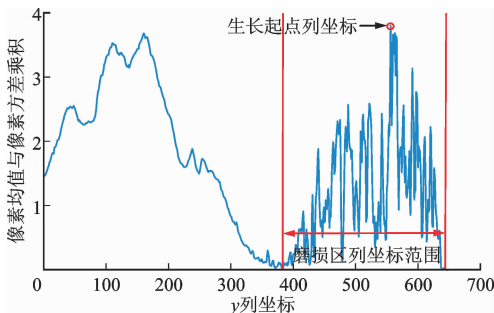
Fig. 9 Contour distribution images

因此,通过图像像素分布特点选取区域生长起点,磨损区一般位于原始图像中间区域,分别计算图像每列、每行像素的均值与方差乘积。经过磨损区域的行、列像素均值高、方差大,如图 10 所示,选择靠近原始图像内部且均值与方差乘积最大行、列的交点作为区域生长起点。

图 10 所示的为存在干扰区的情况下相应的曲



(a) 行像素均值与像素方差乘积



(b) 列像素均值与像素方差乘积

图 10 行、列像素均值与像素方差乘积曲线

Fig. 10 Product curve of line/column pixel mean and variance

线。在不存在明显干扰区域的情况下,磨损区域以外的行、列像素均值与方差的乘积远小于磨损区域,故该算法同样适用。

区域生长算法的另一关键要素为生长阈值,即生长条件。为减少算法的时间复杂度,本文通过图像灰度分布直方图确定初始阈值。由于磨损区与干扰区像素值接近,远大于平滑刀体区的像素值,因此,通过灰度直方图可初步将图像分为两大类——平滑刀体区与非平滑刀体区。如图 11 所示,像素小、频数高的像素点位于平滑刀体区,其余点位于非平滑刀体区。直方图中两区域间局部极小值点对应的像素为临界像素。选择临界像素与生长起点像素间的差值为初始生长阈值,对图像进行分割。

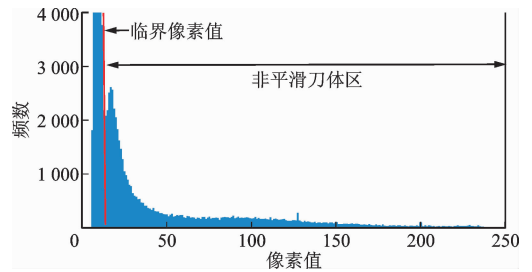


图 11 刀具图像灰度直方图

Fig. 11 Grayscale histogram of tool image

直方图确定的阈值是粗略的,为得到更准确的磨损区域,需更新生长阈值。刀具磨损图像中,像素点可分为磨损区域内的像素点、磨损区域外的像素点两大类。因此,为得到更精确的分割结果,以分割后磨损区与未磨损区之间的类间方差为依据进行阈值更新。未磨损区与磨损区之间的类间方差越大,说明构成图像的两部分之间的差别越大,当部分磨损区被错分为未磨损区或未磨损区被错分为磨损区时,两者之间的差别会减小,即相应的类间方差会减小。因此,类间方差最大的分割意味着错分的概率最小^[23],当分割后的图像中两区域类间方差最大时,分割结束,此时的阈值为最优阈值。图像类间方差 σ^2 可通过下式求得

$$P_1 = \frac{\sum_{i=0}^{T_1} n_i}{N_0} \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{\sum_{i=0}^{T_2} m_i}{N_0} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = P_1(\mu_1 - \mu)^2 + P_2(\mu_2 - \mu)^2 \quad (4)$$

式中: P_1 、 P_2 分别为磨损区、未磨损区中各个像素出现的概率; n_i 、 m_i 分别为灰度值 i 在磨损区、未磨损

区中的像素数; T_1 、 T_2 分别表示磨损区与未磨损区的灰度最大值; N 为图像像素总数; μ_1 、 μ_2 、 μ 分别为磨损区、未磨损区、整幅图像的灰度均值。阈值分割结果如图 12 所示。

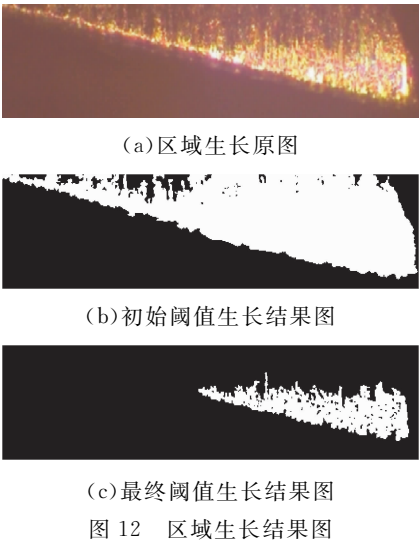


图 12 区域生长结果图

Fig. 12 Resulting images of region growth

对区域生长的结果做进一步优化:图像中理应并入但未能加入结果集中的孤立小像素区域,利用形态学膨胀操作可以从视觉上将其去除,等效为并入结果集;利用矩形 Kernel 对结果图像进行形态学闭操作,优化结果如图 13 所示。



Fig. 13 Binary image of tool wear area

为验证自适应区域生长算法在避免干扰区域影响方面的优越性,分别使用 Otsu 算法、Canny 边缘检测算法以及文献[21]中提出的区域生长算法提取磨损区域,并进行对比,相应结果如图 14 所示。

对比各方法结果可知,Otsu 法与 Canny 边缘检测法都无法去除干扰区的影响,且两方法都会受刀

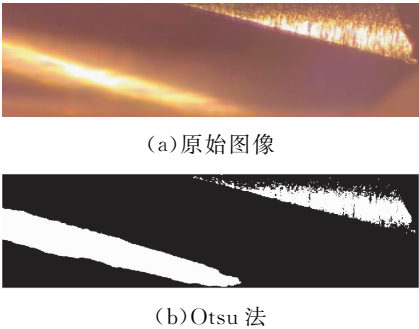


图 14 不同方法提取磨损区域

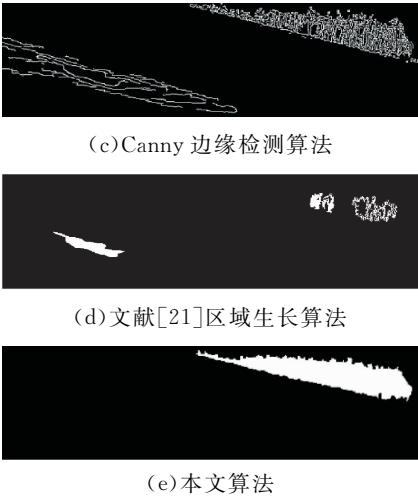


图 14 不同方法提取磨损区域

Fig. 14 Binary images of tool wear area extracted with different methods

具纹理影响。文献[21]提出的区域生长算法中,以质心为生长起点导致出现多个磨损区域,只依据质心附近的像素确定生长阈值,对于干扰严重的图像并不适用。因此,自适应区域生长算法可有效减弱刀体干扰区域的影响,对于提取微型刀具磨损具有一定优势。

2.4 磨损带轮廓重构

刀具磨损区域是沿刀刃展开的,在加工过程中,刀刃会存在微崩刃现象,导致刀刃处刀体材料缺失,磨损带下轮廓线内偏。此时,识别到的磨损带已不再准确,得到的磨损带宽度会整体偏小,因此,需重新构建磨损带的下轮廓线。理论上磨损带下轮廓线,即刀刃可近似看作一条直线,故采用改进的最小二乘法对刀刃原始轮廓线进行重构。

对自适应区域生长算法得到的二值图像进行边缘提取,并将其划分为图 15 所示的上、下轮廓线两部分。

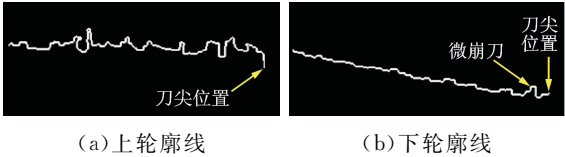


图 15 磨损区域轮廓线

Fig. 15 Outline of wear area

设拟合后的轮廓方程为: $y=kx+b$,图像中像素点坐标为 (x_i,y_i) ,根据最小二乘法可得直线斜率 k 与截距 b 的公式为

$$k = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \tag{5}$$

$$b = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (6)$$

微崩刃的存在与刀尖处过大的磨损导致刀具下轮廓线上存在严重内缩的点,此类点已不再适合作为原始点集参与直线拟合。下轮廓线上远离刀尖处刀刀材料无明显缺失,选用此处点集可有效提高边缘拟合精度。为尽可能多的选择有效拟合点,采用以下算法进行轮廓重构。

(1)选取下轮廓线中 90% 的点作为最小二乘法拟合直线的原始点集,因为下轮廓线末端靠近刀尖处磨损严重,此处的点为确定的误差点,故从远离刀尖处选 90% 的点以去除刀尖点。

(2)通过式(5)(6)计算直线的斜率与截距。

(3)计算下轮廓线上各个点到拟合直线的距离,记录距离过大的点数,若点数超出设定阈值,则去除这些点,并减少参与拟合的点数,更新点集;否则,拟合结束。

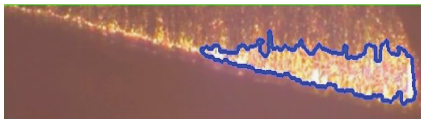
(4)以更新后的点集为基础重复步骤(3)过程,直至与拟合直线之间距离过大的点数量保持在可接受范围内。

拟合的初始阶段,误差点相对较多,点数缩小的速度应较快;随着点集的不断更新,误差点减少,更新速度应逐渐放缓。通过式(7)对参与拟合的点集比例进行更新,实现更新速度的自适应

$$S_{i+1} = S_i - C \frac{N_i}{0.5N_{\max}} \quad (7)$$

式中: S_i 表示第 i 次拟合选用点数占下轮廓线总点数的比例,拟合点从下轮廓线远离刀尖的一侧开始选择; C 为大于小于 1 的常数,决定比例值 S_i 下降的最大速度; N_i 为第 i 次拟合中距离拟合直线过远的点数; $N_{\max}$ 为第 1 次拟合时距离过大的点数,在更新过程中 N_i 处于减小状态。

边界重构后的磨损区域如图 16 所示。



(a)原始磨损区域



(b)轮廓重构后磨损区域

图 16 刀具磨损区域

Fig. 16 Tool wear area

2.5 刀具磨损量计算

通过三目工业检测正置金相显微镜获取刀具磨损图像。图像采集结束后,利用显微镜自带的测绘功能在最后采集的磨损图像上绘制指定长度的线段,作为比例尺。图像处理时,统计图像中比例尺对应的像素数,用比例尺长度除以像素数,得到像素当量 K 。

在提取出完整磨损区域的基础上对刀具磨损信息进行提取,如图 17 所示。本文通过式(8)~(10)提取了刀具最大磨损带宽度、磨损带面积以及平均磨损带宽度。

$$W = K \max \left| \frac{kx_i - y_i + b}{\sqrt{k^2 + 1}} \right|, \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

$$S = K^2 n \quad (9)$$

$$\bar{W} = \frac{S}{KL} \quad (10)$$

式中: W 为最大磨损带宽度; k, b 为下轮廓直线的斜率与截距; x_i, y_i 为磨损带上轮廓线上点的横、纵坐标; S 为磨损带面积; n 为图像中磨损区域包含的像素点数量; $\bar{W}$ 为平均磨损带宽度; L 为下轮廓直线的像素长度。



图 17 刀具磨损信息

Fig. 17 Tool wear information

3 算法有效性分析

为验证本文算法的有效性,选择 $\Phi 0.4$ 钻头进行实验,获取不同加工件数下对应的刀具磨损图像。以工人用显微镜测得的最大磨损带宽度为真实磨损值,分析本文算法的测量误差,并通过分析磨损真值数据与本文算法测得的最大磨损带宽度之间的相关性、一致性来验证本算法的有效性。相应的磨损数据见表 1,表中的测量值指最大磨损带宽度。

3.1 误差分析

以表 1 中人工测量数据为测量真值,分析本文算法测得的最大磨损带宽度误差, R 为测量真值,相对误差为

$$\delta = \frac{|W - R|}{R} \times 100\% \quad (11)$$

通过式(11)可得:对于最大磨损带宽度,本文算法测量的平均相对误差为 5.2%,即平均准确率为 94.8%。

表 1 本文算法结果与人工测量结果对比

Table 1 Comparison of worn belt width from the proposed algorithm and manual measurement

实验组号	磨损带宽度/ μm	
	人工测量结果	本文算法测量结果
1	49.879 3	56.313 5
2	55.510 9	55.156 1
3	32.984 7	34.506 9
4	35.398 2	41.990 7
5	54.706 4	51.143 8
6	49.074 8	46.151 5
7	59.533 4	60.473 7
8	49.879 3	54.205 4
9	57.924 4	57.496 6
10	47.465 8	53.428 2
11	63.555 9	63.805 7
12	60.337 9	64.148 9
13	69.187 4	71.976 3
14	83.668 5	83.791 9
15	45.052 3	46.117 9
16	42.638 8	40.115 8
17	62.751 4	62.296 3
18	79.646 0	77.647 8

3.2 相关性分析

本文算法测量获得的磨损数据由真实磨损值、图像处理算法误差以及随机误差 3 部分组成。对获得的两组数据做相关分析,得两者间的皮尔逊相关系数 $r=0.972$, $P<0.001$,可认为两种方法得到的结果间存在显著相关关系。

3.3 一致性分析

相关性检验反应了两种方法所得结果间存在相关性,但无法量化两方法间的误差。为进一步分析两方法的等效性,采用 Bland-Altman 散点图进行一致性分析。

Bland-Altman 散点图是一种可用于判断两种方式测定结果等效性的方法,可同时考虑测量过程中的系统误差与随机误差^[24-25]。该方法以两组数据的均值 x 为横坐标,差值 y 为纵坐标做散点图,并以 $y_0 \pm 1.96S_d$ 作参考线,其中 y_0 为 y 的均值, S_d 为 y 的方差,称这两参考线之间的区间范围为 95% 一致性界限(95% LoA)。当散点图中至少有 95% 的点位于 LoA 范围内时,可认为两种方法具有较好的一致性,可相互替换。

为使结论具有全局性, x 与 y 之间不应具有任何线性或非线性关系。对 x 与 y 进行相关性分析

与非线性回归,得两者间线性相关系数为 $r=0.188$, $P=0.454$,非线性回归参数如表 2 所示, x 与 y 之间不存在线性与非线性关系。

表 2 非线性回归参数

Table 2 Nonlinear regression parameter		
回归形式	R^2	显著性参数
对数	0.033	0.473
二次	0.038	0.747
三次	0.039	0.744

Bland-Altman 方法是建立在差值 y 满足正态分布的基础上的,对 y 进行 Shapiro-Wilk 检验,得 $P=0.308>0.05$,结合图 18 所示的 Q-Q 图,可认为差值 y 符合正态分布。

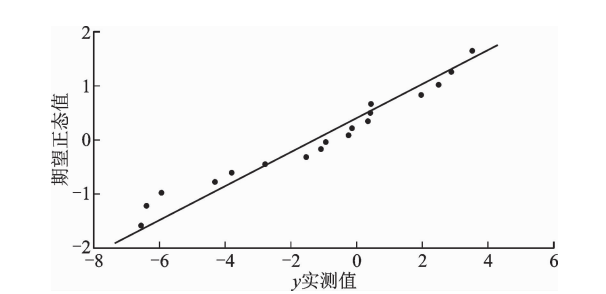


图 18 差值 y 的正态 Q-Q 图

Fig. 18 Normal Q-Q plot of difference

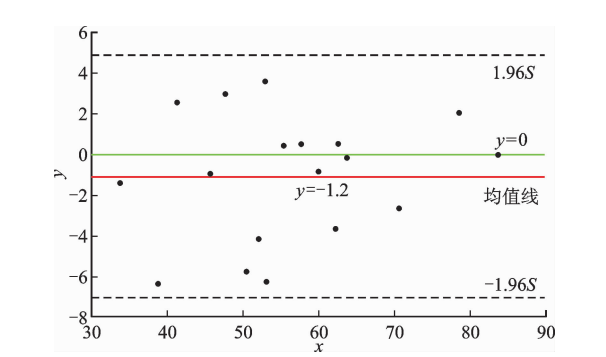


图 19 两种方法测量结果的 Bland-Altman 散点图

Fig. 19 Bland-Altman scatter plot of the measurement results of two methods

计算出 y 的均值为 $-1.198\ 4\ \mu\text{m}$,标准差 S_d 为 $3.092\ 1\ \mu\text{m}$,对应的 LoA 区间范围为 $[-7.259\ 0, 4.862\ 1]\ \mu\text{m}$,具体 Bland-Altman 散点图如图 19 所示。结合图 19 中散点分布,可得 18 个数据点全部位于 LoA 区间范围内,且在一致性范围内最大磨损测量差绝对值为 $6.59\ \mu\text{m}$,可认为两种方法具有较好的一致性,两者可相互替代,进而反映了本文算法的有效性。

4 结 论

本文提出了一种基于自适应区域生长的微型铣刀具磨损检测算法,能够自动识别刀具磨损区域,并修正刀具磨损轮廓线。算法受刀具纹理与刀体反光影响较小,解决了目前微型刀具磨损区域定位困难的问题。所测量的刀具最大磨损带宽度与人工测量值具有很好的一致性,本文方法可以有效替代人工测量法,实现刀具磨损信息的自动测量。同时,避免人工测量过程中手动取点产生的误差,提高了刀具磨损信息的准确度,进而实现微型铣刀具磨损状态的有效检测。

参考文献:

- [1] ARAMESH M, ATTIA M H, KISHAWY H A, et al. Estimating the remaining useful tool life of worn tools under different cutting parameters: a survival life analysis during turning of titanium metal matrix composites (Ti-MMCs) [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016, 12: 35-43.
- [2] 王智明, 任丽娜, 段红燕, 等. 耐用度服从三参数 Weibull 分布的机床刀具在变加工条件下的可靠性评估 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(4): 77-83.
WANG Zhiming, REN Lina, DUAN Hongyan, et al. Reliability assessment of cutting-tool for machine tools with three-parameter Weibull distribution under variable machining conditions [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(4): 77-83.
- [3] 戴稳, 张超勇, 孟磊磊, 等. 采用深度学习的铣刀磨损状态预测模型 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(17): 2071-2078.
DAI Wen, ZHANG Chaoyong, MENG Leilei, et al. Prediction model of milling cutter wear status based on deep learning [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(17): 2071-2078.
- [4] 廖小平, 陈楷, 鲁娟. 基于磨损监测保持切削加工表面质量稳定的实时控制研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(11): 240-248.
LIAO Xiaoping, CHEN Kai, LU Juan. Research on real-time control of machining surface quality stability based on wear monitoring [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(11): 240-248.
- [5] 何彦, 凌俊杰, 王禹林, 等. 基于长短时记忆卷积神经网络的刀具磨损在线监测模型 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(16): 1959-1967.
HE Yan, LING Junjie, WANG Yulin, et al. In-process tool wear monitoring model based on LSTM-CNN [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(16): 1959-1967.
- [6] 陈保家, 陈雪峰, 何正嘉, 等. 利用运行状态信息的机床刀具可靠性预测方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 74-77, 121.
CHEN Baojia, CHEN Xuefeng, HE Zhengjia, et al. Operating condition information-based reliability prediction of cutting tool [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(9): 74-77, 121.
- [7] MOHANRAJ T, SHANKAR S, RAJASEKAR R, et al. Tool condition monitoring techniques in milling process: a review [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(1): 1032-1042.
- [8] 蔡伟立, 胡小锋, 刘梦湘. 基于迁移学习的刀具剩余寿命预测方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(6): 1541-1549.
CAI Weili, HU Xiaofeng, LIU Mengxiang. Prediction method of tool remaining useful life based on transfer learning [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(6): 1541-1549.
- [9] 付洋. 切削加工过程中振动状态及刀具磨损的智能监测技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 3-4.
- [10] KASSIM A A, MANNAN M A, MIAN Zhu. Texture analysis methods for tool condition monitoring [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(7): 1080-1090.
- [11] 贾冰慧, 全燕鸣, 朱正伟. 面向刀具磨损在机检测的机器视觉系统 [J]. *中国测试*, 2014, 40(6): 60-63.
JIA Binghui, QUAN Yanming, ZHU Zhengwei. Machine vision system for on-machine tool wear detection [J]. *China Measurement & Test*, 2014, 40(6): 60-63.
- [12] PFEIFER T, WIEGERS L. Reliable tool wear monitoring by optimized image and illumination control in machine vision [J]. *Measurement*, 2000, 28(3): 209-218.
- [13] 朱爱斌, 何大勇, 邹超, 等. 刀具磨损图像视差图的非标定方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(3): 8-15.
ZHU Aibin, HE Dayong, ZOU Chao, et al. Uncalibrated method for disparity map of tool wear images [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(3): 8-15.
- [14] SORTINO M. Application of statistical filtering for optical detection of tool wear [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(5): 493-497.
- [15] LOIZOU J, TIAN Wenmeng, ROBERTSON J, et al.

- Automated wear characterization for broaching tools based on machine vision systems [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, 37: 558-563.
- [16] 叶祖坤, 李恒, 查文彬, 等. 采用局部阈值分割的刀具损伤视觉检测方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(4): 52-60.
- YE Zukun, LI Heng, ZHA Wenbin, et al. A visual detection method of Tool damage using local threshold segmentation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(4): 52-60.
- [17] 魏效玲, 崔岳, 王国锋. 基于机器视觉的铣刀侧铣磨损测量 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021(1): 88-91.
- WEI Xiaoling, CUI Yue, WANG Guofeng. Research on milling wear of cutter side based on machine vision [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2021(1): 88-91.
- [18] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection [C] // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1597-1604.
- [19] 郑又能, 肖宇峰, 寸超, 等. 基于改进区域生长的水岸线提取方法研究 [J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(6): 1876-1881.
- ZHENG Youneng, XIAO Yufeng, CUN Chao, et al. Research on waterfront line extraction based on improved region growing method [J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(6): 1876-1881.
- [20] 宋红, 王勇, 黄小川, 等. 基于动态自适应区域生长的肝脏 CT 图像肿瘤分割算法 [J]. *北京理工大学学报*, 2014, 34(1): 72-76.
- SONG Hong, WANG Yong, HUANG Xiaochuan, et al. A dynamic adaptive region growing segmentation algorithm for tumor of liver CT images [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(1): 72-76.
- [21] 李姗姗, 刘丽冰, 李莉, 等. 基于区域生长法的数控刀具磨损状态检测方法 [J]. *制造技术与机床*, 2017(2): 132-136.
- LI Shanshan, LIU Libing, LI Li, et al. A method of CNC tool wear condition monitoring based on region growing arithmetic [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2017(2): 132-136.
- [22] 杨先凤, 李小兰, 贵红军. 改进的自适应伽马变换图像增强算法仿真 [J]. *计算机仿真*, 2020, 37(5): 241-245.
- YANG Xianfeng, LI Xiaolan, GUI Hongjun. Image enhancement algorithm simulation based on improved adaptive gamma transformation [J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(5): 241-245.
- [23] 汪恩良, 徐雷, 韩红卫, 等. 基于 OTSU 算法提取寒区河流流冰密度研究 [J/OL]. *应用基础与工程科学学报* [2021-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.tb.20210408.1035.002.html>.
- WANG Enliang, XU Lei, HAN Hongwei, et al. Extracting river ice concentration in cold regions based on the OTSU algorithm [J/OL]. *Journal of Basic Science and Engineering* [2021-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.tb.20210408.1035.002.html>.
- [24] 蒋伏松. 两种测量结果的一致性和差异性评价方法 [J]. *临床医学研究与实践*, 2017, 2(28): 116-117.
- JIANG Fusong. Consistency and variability evaluation of two kinds of measurement results [J]. *Clinical Research and Practice*, 2017, 2(28): 116-117.
- [25] 萨建, 刘桂芬. 定量测量结果的一致性评价及 Bland-Altman 法的应用 [J]. *中国卫生统计*, 2011, 28(4): 409-411, 413.
- SA Jian, LIU Guifen. Assessing the agreement of quantitative measurement data and the application of Bland-Altman method [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2011, 28(4): 409-411, 413.

(编辑 杜秀杰)