

采用切削刃重构的刀具磨损视觉检测方法

叶祖坤^{1,2}, 周军¹, 秦超峰¹, 林剑波², 张诗怡², 潘一², 王禹林²
(1. 中国船舶集团有限公司第七〇五研究所昆明分部, 650106, 昆明;
2. 南京理工大学机械工程学院, 210094, 南京)

摘要: 针对目前难以在复杂恶劣的油污粉尘环境中实现对刀具图像的高质量采集和刀具磨损视觉特征的高精检测,对磨损缺失刀刃这一类最为典型且危害最大的刀具磨损开展研究,提出一种采用切削刃重构的刀具磨损视觉检测方法。首先,在数控机床加工台一侧搭建集成了一套具有镜头保护与清洁功能的图像采集装置,用于在机定期自动采集刀具磨损图像;然后,将采集的图像经以太网传输至计算机图像处理系统,利用设计的切削刃重构法对刀具磨损缺失区域进行切削刃重构,以此得到完整刀具图像,进而利用图像差分,将重构后的刀具图像与磨损刀具图像相减,实现刀具磨损缺失区域的自动识别;最后,基于识别的磨损特征测量刀具磨损的评估指标参数值,并判断是否需要换刀。实验结果表明:所提检测方法具有较大优势,解决了油污粉尘机加环境下刀具磨损图像采集困难的难题和难以从图像中分割识别刀具磨损缺失特征的难题,实现了刀具磨损的视觉高精高效检测;与现有的刀具磨损视觉检测系统以及现有的 Canny 边缘检测法、自适应阈值法等 6 种图像分割方法相比,所提方法避免了拆卸刀具进行离线显微镜检测和模板匹配的烦琐过程,可进行在机自动检测,同时平均检测准确率至少提升 20%。

关键词: 刀具磨损;视觉检测;图像分割;切削刃重构;自动识别

中图分类号: TP186 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202211002 **文章编号:** 0253-987X(2022)11-0011-10

Visual Detection of Tool Wear Through Cutting Edge Reconstruction

YE Zukun^{1,2}, ZHOU Jun¹, QIN Chaofeng¹, LIN Jianbo²,
ZHANG Shiyi², PAN Yi², WANG Yulin²

(1. Kunming Branch of the 705 th Research Institute of CSSC, Kunming 650106, China;
2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Currently, it is difficult to realize high-quality collection of tool images and high-precision visual detection of tool wear in complex and harsh oil and dust machining environment. For this reason, this paper proposes a cutting edge reconstruction method for visual detection of blade missing due to the most typical and harmful tool wear. First, an image acquisition device with lens protection and cleaning functions is built and integrated on one side of the NC machine tool processing table, to automatically collect tool wear images on a regular basis on the machine. Then the collected images are transmitted to the computer image processing system via Ethernet for reconstruction of the cutting edge missing from wear with the proposed method so as to obtain the complete tool image. After that, the reconstructed tool image is subtracted from the worn tool image by image difference, so as to realize the automatic recognition of the area missing from

收稿日期: 2022-06-24。 作者简介: 叶祖坤(1994—),男,硕士,助理工程师;王禹林(通信作者),男,教授,博士生导师。
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075267);国家重点研发计划资助项目(2018YFB2002205)。
网络出版时间: 2022-08-05 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220804.1714.004.html>

tool wear. Finally, based on the identified wear characteristics, the parameter values of the tool wear evaluation indexes are measured to determine whether to change the tool. The experimental results show that the method proposed in this paper have great advantages: It tackles the difficulty in tool wear image acquisition and segmentation to visually recognize the characteristics of the area missing from tool wear in the oil and dust machining environment, and realizes the high-precision and high-efficiency visual recognition and detection of tool wear. Compared with the existing six image segmentation algorithms including the visual recognition and detection system for tool wear, the Canny edge detection method, and the adaptive threshold method, the method proposed helps avoid the tedious process of disassembling the tool for offline microscope detection and template matching, and improves the average detection accuracy by at least 20%.

Keywords: tool wear; visual detection; image segmentation; cutting edge reconstruction; automatic recognition

高端机床作为工业母机,是核心件制造的基础^[1]。刀具作为机床的“牙齿”,一旦发生磨损而未及时换刀^[2-3],将严重影响加工质量,甚至导致零件报废,耽误生产进度^[4-5]。为确保安全,避免此类灾难性刀具故障的发生,厂商只能在刀具远未到达使用寿命时就提前换刀,造成刀具大量浪费。因此,亟需对自动化加工车间中的刀具磨损状态进行高效、高精度监控^[6-7]。

目前,许多学者通过间接监测刀具加工过程中的切削力^[8-9]、声发射^[10-11]、功率/电流^[12]、振动^[13-14]等传感器信号的变化判断刀具是否磨损^[15-16]。然而,基于传感器信号的监测方法受切削条件影响较大,当切削条件发生变化时,此方法将不再适用。一些学者利用机器视觉直接检测刀具表面状态,提取刀具破损信息。然而机器视觉检测法存在两大难点。一是缺乏一套面向数控加工环境的刀具损伤在机智能监测系统。陈晓波等发明了一种正交视觉检测系统^[17],然而该系统需要将刀具从机床上拆卸下来,清洗后在实验室环境中进行离线检测,占用生产工时,检测效率极低。Hou等设计了刀具磨损在位监测系统^[18],然而该检测系统没有考虑检测环境的自动清洁,在复杂恶劣的油污粉尘机加环境中应用受限。二是缺乏一种实现刀具破损信息高精识别的图像处理方法。Hou等采用纯最大类间方差法、均值迭代法及形态学操作处理刀具图像^[18];Peng等采用区域生长法处理刀具图像^[19];邓晓鹏等提出一种自适应区域生长法处理刀具图像^[20];叶祖坤等提出一种局部阈值分割法处理刀具图像^[21];秦国华等提出局部方差算法处理刀具图像^[22];Zhang等通过列搜索找到损伤边界像素,最终获得刀具最大磨损宽度^[23]。然而,以上视觉检测方法仅针对磨损擦伤

类的刀具有效,对磨损缺失刀刃类的刀具无法有效检测,图1(a)所示为刀具磨损擦伤示意图,图1(b)为刀具磨损刀刃缺失示意图。目前对于磨损刀刃缺失的视觉检测方法,鲜有学者研究。Mook等采集新刀具与加工后的刀具图像,经过二值化后以两幅二值图像的差分结果作为刀具的磨损结果^[24]。此类基于形状匹配的刀具破损检测需要采集新刀图像,并且保证新刀图像与磨损刀具图像采集环境一致,对采集系统要求较高,而在实际加工环境中难以保证两次采集刀具图像环境一致,检测准确率低,且需采集新刀图像,极大降低了检测效率,实用性较差。

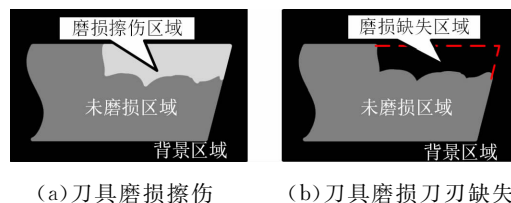


图1 刀具磨损示意图

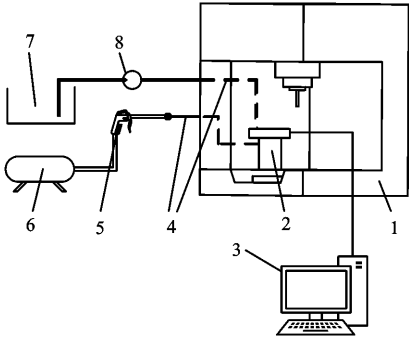
Fig. 1 Schematic diagram of tool wear

因此,本文针对磨损缺失刀刃这一类最为典型且危害最大的刀具磨损,提出一种采用切削刃重构的刀具磨损视觉检测方法,旨在解决油污粉尘机加环境下刀具磨损图像采集困难的难题和难以从图像中分割提取刀具磨损缺失特征的难题,避免拆卸刀具进行离线检测和模板匹配的繁琐过程,实现油污粉尘机加环境下刀具磨损的视觉高精高效检测。

1 刀具磨损机器视觉检测系统

图2所示为具有镜头保护与清洁功能的集成式刀具磨损在机视觉检测系统组成示意图,主要由刀具图像在位采集装置、计算机图像处理模块、带喷嘴

的橡胶软管、气动高压喷枪、气泵、水箱、水泵等组成。水清洗软管、水箱、水泵、气吹干软管、气动高压喷枪、空气压缩机等主要用于对刀具进行水清洗与气吹干,去除刀具上的污垢及铁屑,保证图像采集前,刀具表面处于清洁状态。刀具图像在机采集装置设置在数控加工设备切削位置一侧采集刀具磨损图像。计算机图像处理模块用于处理刀具磨损图像,提取刀具磨损信息。



1—数控加工设备;2—刀具图像在机采集装置;
3—计算机图像处理模块;4—橡胶软管;
5—气动高压喷枪;6—气泵;7—水箱;8—水泵。
图 2 集成式刀具磨损在机检测系统
Fig. 2 Integrated tool wear on-machine detection system

刀具图像在机采集装置结构设计如图 3 所示,主要包括保护盒、伸缩翻转机构、拍照装置工作头。保护盒用于保护视觉系统,防止机床加工产生的油污粉尘直接喷溅在视觉系统上,其上设计有两个喷嘴,分别连接刀具水清洗软管与气吹干软管。伸缩翻转机构用于固定视觉系统并控制视觉系统采集刀具侧刃及底刃图像,其具有 0°工作位置和 90°工作位置,转角误差为±0.02°,如图 4、图 5 所示。当处于 90°工作位置时,视觉系统采集刀具底刃图像。当处于 0°工作位置时,视觉系统采集刀具侧刃图像,采集侧刃时,需使主轴带着刀具旋转,对每个刃进行单独拍照,旋转角 ω 可根据下式确定

$$\omega = \frac{360^\circ}{Z} \tag{1}$$

式中 Z 为刀具侧刃个数。

拍照装置工作头结构如图 6 所示,主要由相机、镜头、环形光源、环形气幕构成,其中相机与镜头主要用于采集图像,环形光源主要用于提供照明,环形气幕用于保护镜头,防止采集图像过程中机床内的油雾粉尘等污染镜头。

为进一步提高检测效率,本文还设计了变频检测法,即在刀具加工全寿命周期内,利用机床空闲时

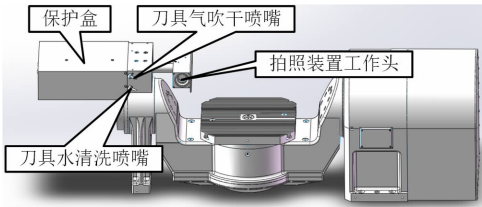


图 3 刀具图像在机采集装置
Fig. 3 On machine tool image acquisition device

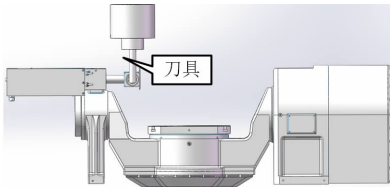


图 4 刀具拍照检测装置 0°工作位置示意图
Fig. 4 Schematic diagram of 0° working position of tool photographing detection device

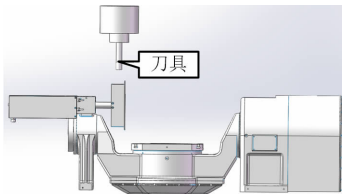


图 5 刀具拍照检测装置 90°工作位置示意图
Fig. 5 Schematic diagram of 90° working position of tool photographing detection device

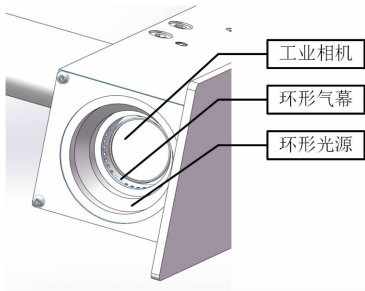


图 6 拍照装置工作头
Fig. 6 Working head of photographing device

间进行视觉检测,根据每次实测的刀具破损量智能调节检测频率。图 7 所示为在机视觉检测系统工作流程示意图,主要包含刀具清洗,刀具图像采集、破损特征提取、破损量计算、破损程度判定等步骤。在系统检测前,需对刀具进行清洗吹干,去除刀具表面的油污粉尘,之后采集刀具图像,从图像中提取刀具破损特征。进一步地,根据提取的破损特征计算刀具破损量,并判定所检测的刀具破损量是否超出刀具损伤标准 V_B ,若超过,则更换刀具,若没有,则智

能调节检测频率,机床继续加工。

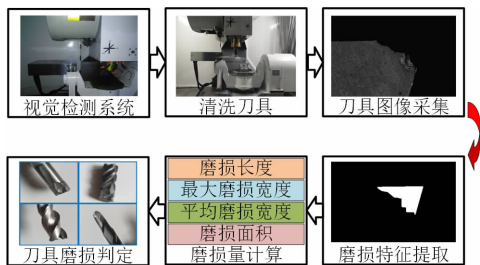


图 7 在机视觉检测系统工作流程

Fig. 7 Workflow of on-machine visual detection system

2 刀具破损机器视觉检测算法

2.1 刀具破损特征提取

图 8 所示为采用切削刃重构的刀具磨损缺失区域提取流程,主要包含数据点采集、刀具重构、图像差分 3 步;数据点采集是指采用 Otsu 法^[18]对预处理后的刀具图像进行二值化操作,将刀具未磨损区域像素置为 255,背景区域与磨损缺失区域像素置为 0,图 9(a)所示为二值化后的刀具图像。然后,进行 Canny 边缘检测,提取磨损刀具的轮廓边缘,并建立图像坐标系,如图 9(b)所示。进而分别截取刀具图像中未磨损的上、下切削刃区域,如图 9(c)、图 9(d)所示。在 Canny 边缘检测图像中对截取的上、下切削刃区域进行像素扫描,获得 1 个切削刃像素点,第 k 个像素点坐标记为 (x_k, y_k) ,其中 $1 \leq k \leq l$ 。扫描完成后将获取的未磨损切削刃坐标保存。

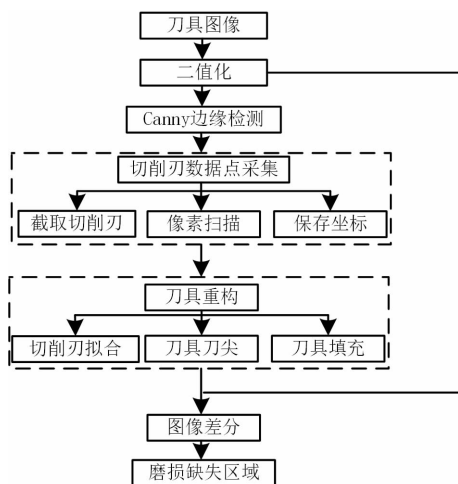


图 8 采用切削刃重构的刀具磨损缺失区域提取流程

Fig. 8 Extraction process of tool wear missing area using cutting edge reconstruction

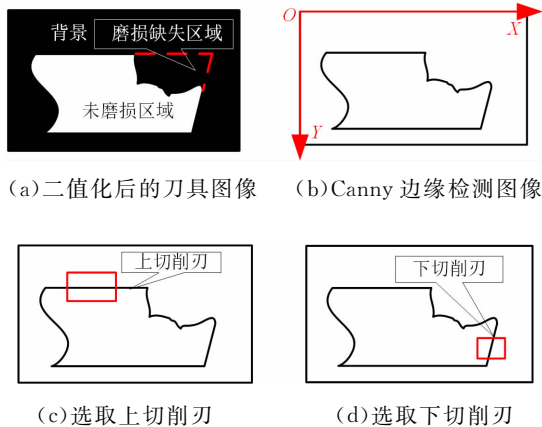


图 9 切削刃数据点采集

Fig. 9 Cutting edge data point acquisition

对磨损缺失区域的上、下切削刃进行拟合重建,如图 10(a)、图 10(b)所示,拟合的直线可表示为

$$y = \alpha x + \beta \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{e^2} \sum_{k=1}^l (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y}) \quad (3)$$

$$\beta = \bar{y} - \alpha \bar{x} \quad (4)$$

$$e^2 = \sum_{k=1}^l (x_k - \bar{x})^2 \quad (5)$$

式中: α 为切削刃拟合直线的斜率; β 为切削刃拟合直线的截距; (x_k, y_k) 为切削刃像素点坐标。

所重建的切削刃的交点即为刀尖,刀尖坐标为

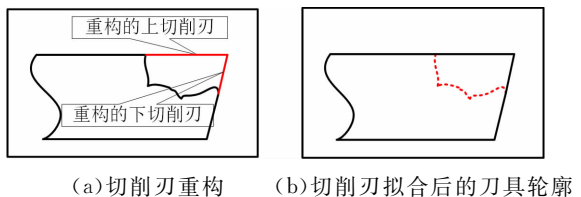
$$x_0 = \frac{\alpha_1 \bar{x}_1 - y_1 - \alpha_2 \bar{x}_2 + y_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (6)$$

$$y_0 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) + \alpha_1 \bar{y}_2 - \alpha_2 \bar{y}_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (7)$$

式中: $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ 分别为未损伤的上、下切削刃像素点横坐标平均值; $\bar{y}_1, \bar{y}_2$ 分别为未损伤的上、下切削刃像素点纵坐标平均值; α_1 为上切削刃拟合直线的斜率; α_2 为下切削刃拟合直线的斜率; x_0, y_0 分别为刀尖横、纵坐标值。

进而,基于拟合的切削刃,将图像中刀具区域的像素置为 255,显示为白色,至此基于磨损的刀具图像完成了刀具重构,得到新刀图像,如图 10(c)所示。

图像差分是利用重构后的新刀图像减去二值化后的磨损刀具图像,最终得到磨损区域。图 11 为通过切削刃重构方法提取的刀具磨损缺失区域。



(a) 切削刃重构

(b) 切削刃拟合后的刀具轮廓

刀具重构是指在 Canny 边缘检测图像上分别



(c)切削刃重构后的刀具

图 10 刀具重构

Fig. 10 Tool reconstruction

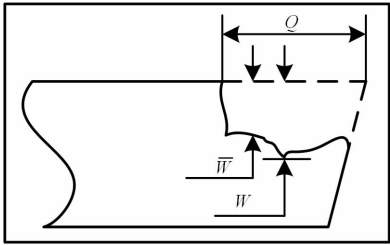


图 13 刀具后刀面磨损缺失示意图

Fig. 13 Schematic diagram of tool flank wear missing

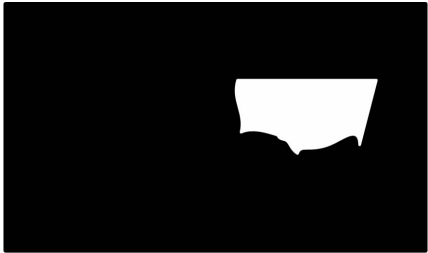


图 11 刀具磨损缺失区域

Fig. 11 Tool wear missing area

2.2 刀具破损特征测量

在加工过程中,刀具会在前刀面、后刀面、刀尖和边界产生磨损,如图 12 所示。由于后刀面磨损对加工精度和加工稳定性的影响比前刀面磨损、刀尖磨损和边界磨损更为显著,因此在实际生产中,刀具磨损评估指标通常是基于刀具后刀面磨损建立的。图 13 为刀具后刀面磨损示意图。最大磨损宽度用 W 表示,平均磨损宽度用 $\bar{W}$ 表示,磨损长度用 Q 表示,磨损面积用 S 表示。ISO3685 标准规定,将刀具后刀面平均磨损宽度作为衡量刀具磨损状态的评估指标,当平均磨损宽度大于 0.3 mm 时,则需更换刀具^[22]。因此,可以通过提取刀具后刀面的磨损缺失区域并计算其平均磨损宽度 $\bar{W}$ 来判断刀具的破损程度。为全面有效地评估刀具的磨损状态,本文将同时测量刀具后刀面的平均磨损宽度,以平均磨损宽度、最大磨损宽度、磨损长度、磨损面积 4 个几何特征作为刀具磨损的量化评估指标。

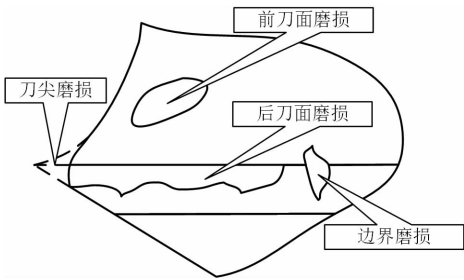


图 12 刀具磨损示意图

Fig. 12 Schematic diagram of tool wear

从图像中获取的刀具磨损几何特征是以像素为单位的,需转化为实际尺寸。本文采用图 14 所示的标定板进行像素当量标定,标定后,图像中每一个像素所代表的实际尺寸可按下式计算得到

$$K = \sqrt{\frac{D^2 R}{M}} \tag{8}$$

式中: D 为标定板方形的实际边长; R 为标定板中方形总个数; M 为在图像中表示方形的像素个数; K 为每个像素的实际尺寸。

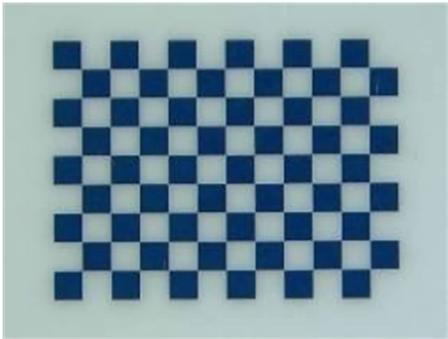


图 14 微型标定板

Fig. 14 Micro calibration board

获得像素的实际尺寸后,需对从图像中提取的刀具磨损特征进行列扫描,以获取图像中分别表示刀具磨损长度、最大磨损宽度、平均磨损宽度、磨损面积所用的像素个数,如图 15 所示。进而,将每个几个特征的像素个数与每个像素的实际尺寸 K 相乘,即可得到刀具的实际磨损量。根据上述原理,刀具的实际磨损量可按式(9)~(12)求得

$$Q = KN_Q \tag{9}$$

$$W = KN_W \tag{10}$$

$$\bar{W} = K \frac{N_S}{N_L} \tag{11}$$

$$S = K^2 N_S \tag{12}$$

式中: N_Q 为图像中表示刀具磨损长度所用的像素个数; N_W 为图像中表示刀具磨损宽度所用的像素个数; N_S 为提取到的刀具磨损区域的全部像素个数。

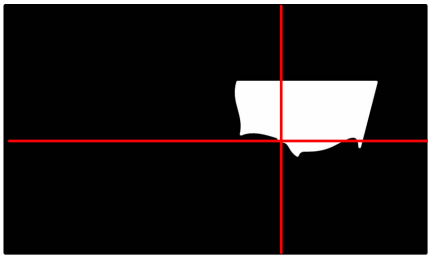


图 15 刀具磨损缺失区域列扫描示意图

Fig. 15 Schematic diagram of column scanning in tool wear missing area

3 刀具磨损机器视觉检测

3.1 实验设计

从加工现场选取了 6 把典型的磨损程度的立铣刀进行实地检测验证。首先利用显微镜测量磨损刀具的真实磨损量作为理论值,进而将本文系方法所检测的结果与显微镜检测结果进行对比。为进一步验证本文方法的优越性,利用目前已取得较好效果的 Otsu 法^[18]、均值迭代法^[18]、区域生长法^[19]、Canny 边缘检测法^[22]、局部方差法^[22]、自适应阈值法^[25]等方法分别对 6 把刀具进行磨损检测,并将其检测结果与本文方法进行对比。图 16 为刀具磨损在机视觉检测系统实物图。该实物系统选用的工业相机为 MV-CE100-30GM 工业面阵相机,分辨率为 3 840×2 748 像素,像元尺寸为 1.67 μm×1.67 μm,帧率为 7 帧/s;选用的镜头为 MVL-HT-05-110 远心镜头,放大倍率为 0.5,景深为 3 mm,光学畸变小于等于 0.1%,像面尺寸为 8.4 mm;选用的光源为白色环形光源,使用寿命为 6 000~10 000 h。经标定,利用该套实物系统获取的图像 K=3.339,即利用该套实物系统获取的图像,图像中每一个像素所代表的实际尺寸为 3.339 μm×3.339 μm。

本文通过比较平均准确率评估各方法的检测效

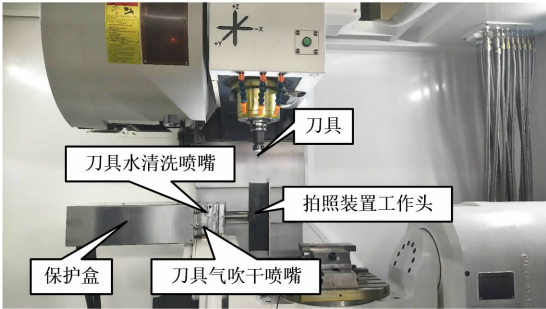


图 16 刀具磨损在机视觉检测系统实物图

Fig. 16 Physical drawing of tool wear on machine detection system

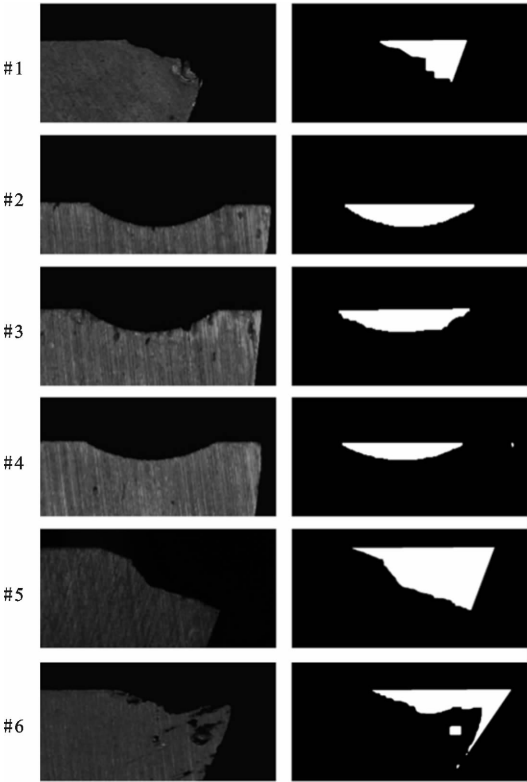
果,平均准确率可按式计算

$$\xi = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i}\right) \times 100\% \quad (13)$$

式中: y_i 为显微镜检测值; $\hat{y}_i$ 为本文系统与方法检测值; n 为组数。

3.2 实验结果与分析

图 17 所示为本文所提的刀具磨损检测方法对多把不同磨损程度的刀具底刃进行磨损缺失区域提取的结果图, #1 表示第一把刀具底刃, #2 表示第 2 把刀具底刃,以此类推;图 18 所示为本文所提的刀具磨损检测方法对多把不同磨损程度的刀具侧刃进行磨损缺失区域提取的结果图, #1' 表示第一把刀具侧刃, #2' 表示第 2 把刀具侧刃,以此类推;图 19 为刀具底刃检测结果与显微镜检测结果的对比如图,图 20 为刀具侧刃检测结果与显微镜检测结果的对比如图;表 1、表 2 分别为 6 把刀具底刃与侧刃磨损检测量化分析结果。从检测结果可看出:所提的刀具磨损在机视觉检测方法能够实现对刀具底刃与侧刃磨损的高精识别与测量,所测量的刀具磨损量和显微镜实测的刀具磨损量高度一致,对 6 把刀具进行检测,所测量的底刃磨损长度、最大磨损宽度、平均磨损宽度、磨损面积的平均准确率分别达 98.27%、



(a) 原始图像 (b) 磨损缺失区域

图 17 刀具底刃磨损识别效果

Fig. 17 Recognition effect of tool bottom edge wear

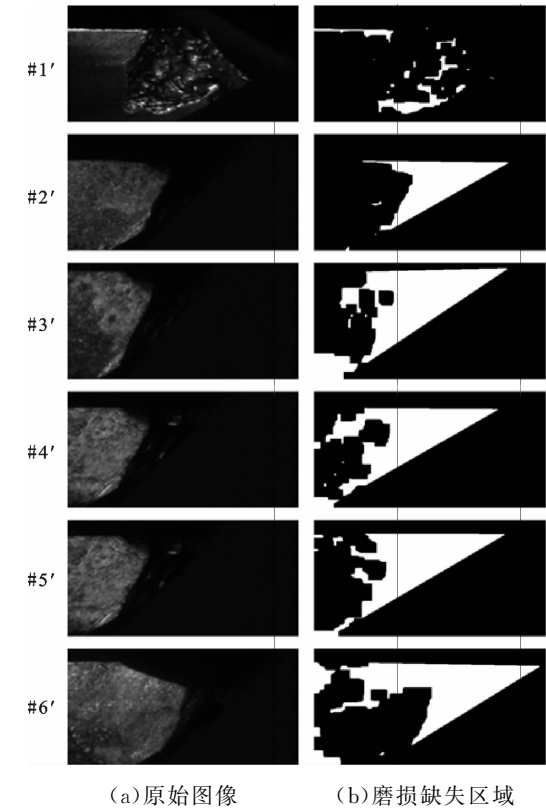


图 18 刀具侧刃磨损识别效果

Fig. 18 Recognition effect of tool side edge wear

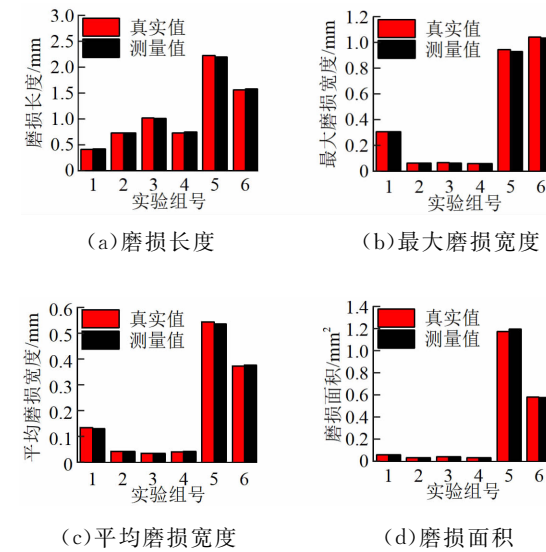


图 19 底刃检测结果

Fig. 19 Detection results of bottom edge

98.61%、98.08%、98.30%，所测量的侧刃磨损长度、最大磨损宽度、平均磨损宽度、磨损面积的平均准确率分别达 95.66%、96.58%、96.15%、95.68%。侧刃识别效果略逊于底刃，经分析主要原因为采集侧刃的光照偏暗，侧刃结构复杂，呈螺旋状，易吸收光照，而底刃基本呈平面，易反射光照，在图像采集

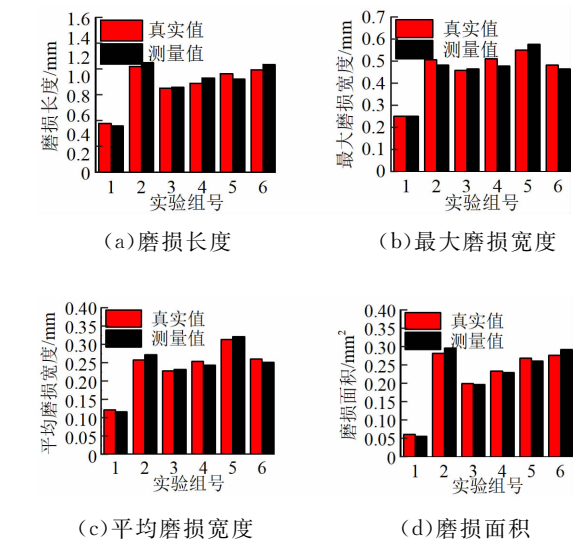


图 20 侧刃检测结果

Fig. 20 Detection results of side edge

过程中，侧刃图像采集相比于底刃图像采集需要更强的光照条件才能保证较好的采集效果。

表 1 采用切削刃重构的刀具底刃磨损检测准确率

Table 1 Accuracy of tool bottom edge wear detection using cutting edge reconstruction

实验 组号	检测准确率/%			
	长度	最大宽度	平均宽度	面积
1	97.04	99.99	97.96	97.01
2	99.05	98.13	98.19	98.75
3	98.94	97.88	97.41	97.63
4	96.82	97.70	97.70	98.75
5	98.72	98.40	98.42	98.15
6	99.10	99.53	98.82	99.50
平均值	98.27	98.61	98.08	98.30

表 2 采用切削刃重构的刀具侧刃磨损检测准确率

Table 2 Accuracy of tool side edge wear detection using cutting edge reconstruction

实验 组号	检测准确率/%			
	长度	最大宽度	平均宽度	面积
1	95.09	99.79	96.26	91.21
2	96.01	95.23	94.21	94.74
3	98.98	98.81	98.43	98.62
4	93.92	93.72	95.75	97.77
5	94.79	95.43	97.43	97.19
6	95.18	96.55	96.81	94.54
平均值	95.66	96.58	96.15	95.68

图 21 为不同视觉检测方法在实际加工环境中所识别的刀具底刃磨损效果。图 22 为不同视觉诊断方法在实际加工环境中所识别的刀具侧刃磨损效果。表 3 为各方法对刀具底刃、侧刃磨损进行诊断的量化分析结果对比。通过对比可知:在实际加工环境中,针对在机刀具磨损图像,Otsu 法、均值迭代法、自适应阈值法、区域生长法均未能识别到刀具侧

刃磨损信息;Canny 边缘检测法、局部方差法仅能识别到部分损伤信息,检测平均准确率仅为 45%~75%;所提的采用切削刃重构的刀具磨损视觉检测方法取得最好的诊断效果,对实际加工环境中刀具磨损检测平均准确率可达 98%左右,与 Canny 边缘检测法、自适应阈值法等 6 种方法相比,平均检测准确率至少提升 20%。

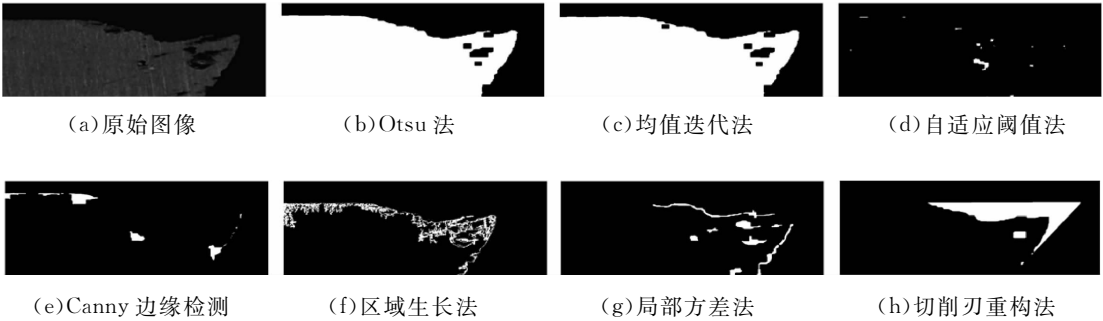


图 21 不同方法所识别的刀具底刃磨损特征

Fig. 21 Characteristics of tool bottom edge wear identified by different methods

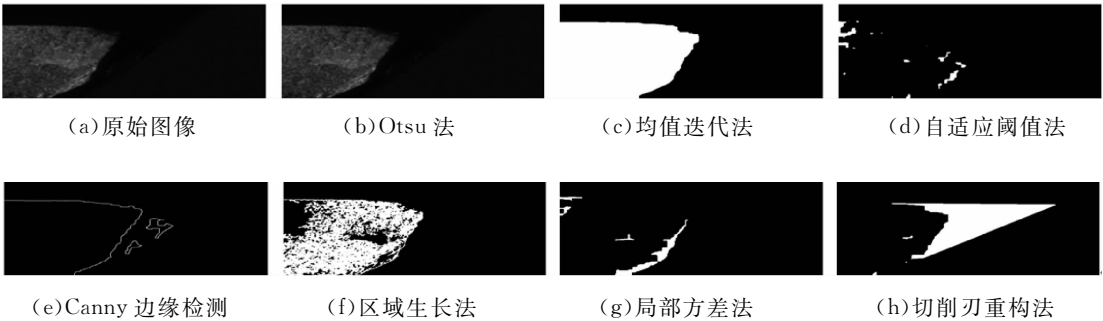


图 22 不同方法所识别的刀具侧刃磨损特征

Fig. 22 Characteristics of tool edge breakage identified by different methods

表 3 不同方法对刀具磨损检测的平均准确率对比

Table 3 Comparison of average accuracy of tool wear detection by different methods		
方法	检测准确率/%	
	底刃	侧刃
Otsu 法	—	—
均值迭代法	—	—
自适应阈值法	—	—
Canny 边缘检测	69.66	49.96
区域生长法	—	—
局部方差法	72.71	52.59
本文切削刃重构法	98.08	96.15

4 结 论

刀具磨损检测对保证加工质量,提高生产效益,

降低制造环境危害具有重要意义。文章提出了一种采用切削刃重构的刀具磨损视觉检测方法。首先,研制了一套具有镜头保护与清洁功能的集成式视觉检测系统,提出变频检测方案,实现了油污粉尘机加环境下刀具磨损图像的高质量采集;之后,设计刀具磨损缺失区域自动识别与提取的切削刃重构法,实现了刀具磨损缺失区域的自动识别与精确测量;最后,在实际加工环境下采集了刀具磨损图像,验证所提出的刀具磨损视觉检测方法的有效性。实验结果表明:文章所提的刀具磨损视觉检测方法对实际加工环境中刀具磨损检测平均准确率可达 98%左右。与现有的刀具磨损检测系统以及现有已取得较好效果的 Canny 边缘检测法、自适应阈值法等 6 种方法相比,解决了油污粉尘机加环境下刀具磨损图像采集困难和从图像中提取刀具磨损缺失特征困难的两大难题,避免了拆卸刀具进行离线检测和模板匹配

的繁琐过程,实现了油污粉尘机加环境下刀具磨损的在机高精高效检测,平均检测准确率至少提高 20%,可为今后刀具磨损状态监测提供有效技术支持,且该系统和方法可有效推广至车削刀具,铣削刀具、钻削刀具等的磨损检测。在后续的研究中,将进一步研制一套刀具磨损在线预警子系统增加到整套检测系统中,使整套检测系统能够自主判断检测时机,进一步提高刀具磨损检测的智能化水平。

参考文献:

- [1] ALBERT M. The strategic value of machine tool flexibility [J]. *Modern Machine Shop*, 2022, 95(2): 66-70.
- [2] 朱爱斌,胡浩强,何大勇,等. 采用频域融合方法的砂轮刀具磨损三维重构技术 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(5): 82-86, 133.
ZHU Aibin, HU Haoqiang, HE Dayong, et al. Three-dimensional reconstruction of tool wear area for grinding wheel using frequency-domain fusion method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(5): 82-86, 133.
- [3] GAO Yifan, KO J H, LEE H P. Meso-scale tool breakage prediction based on finite element stress analysis for shoulder milling of hardened steel [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 55: 31-40.
- [4] DHOBAL N, MULIK S, JEGADEESHWARAN R, et al. Supervision of milling tool inserts using conventional and artificial intelligence approach: a review [J]. *Sound & Vibration*, 2021, 55(2): 87-116.
- [5] SERIN G, SENER B, OZBAYOGLU A M, et al. Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(3): 953-974.
- [6] 朱爱斌,何仁杰,吴玥璇,等. 考虑变换域融合方法的刀具磨损区域三维重构 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(12): 76-83.
ZHU Aibin, HE Renjie, WU Yuexuan, et al. Three-dimensional reconstruction of tool wear area considering transform-domain fusion [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(12): 76-83.
- [7] 周俊杰,余建波. 基于机器视觉的加工刀具磨损量在线测量 [J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(6): 741-749.
ZHOU Junjie, YU Jianbo. Online measurement of machining tool wear based on machine vision [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2021, 55(6): 741-749.
- [8] LIU Tongshun, ZHU Kunpeng, WANG Gang. Micro-milling tool wear monitoring under variable cutting parameters and runout using fast cutting force coefficient identification method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(11): 3175-3188.
- [9] JAMSHIDI M, RIMPAULT X, BALAZINSKI M, et al. Fractal analysis implementation for tool wear monitoring based on cutting force signals during CFRP/titanium stack machining [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(9): 3859-3868.
- [10] SUN Shixu, HU Xiaofeng, ZHANG Wenjuan. Detection of tool breakage during milling process through acoustic emission [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(5): 1409-1418.
- [11] LENG Sheng, WANG Zhan, MIN Tao, et al. Detection of tool wear in drilling CFRP/TC4 stacks by acoustic emission [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2020, 8(3): 463-470.
- [12] WANG Dashuang, HONG Rongjing, LIN Xiaochuan. A method for predicting hobbing tool wear based on CNC real-time monitoring data and deep learning [J]. *Precision Engineering*, 2021, 72: 847-857.
- [13] MA Kaile, WANG Guofeng, YANG Kai, et al. Tool wear monitoring for cavity milling based on vibration singularity analysis and stacked LSTM [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(5): 4023-4039.
- [14] LEI Zhi, ZHU Qinsong, ZHOU Yuqing, et al. A GAPSO-enhanced extreme learning machine method for tool wear estimation in milling processes based on vibration signals [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing: Green Technology*, 2021, 8(3): 745-759.
- [15] 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.
- [16] 李恒,叶祖坤,查文彬,等. 基于多传感器信息决策级融合的刀具磨损在线监测 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(9): 2024-2031.
LI Heng, YE Zukun, ZHA Wenbin, et al. Tool wear

- online monitoring based on multi-sensor information decision-making level fusion [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(9): 2024-2031.
- [17] 上海交通大学. 用于检测立铣刀磨损状态的正交视觉检测系统: CN201110400626.8 [P]. 2012-07-11.
- [18] HOU Qiulin, SUN Jie, HUANG Panling. A novel algorithm for tool wear online inspection based on machine vision [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101(9): 2415-2423.
- [19] PENG Ruitao, PANG Haolin, JIANG Haojian, et al. Study of tool wear monitoring using machine vision [J]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2020, 54(3): 259-270.
- [20] 邓晓鹏, 王妍, 洪煜, 等. 采用自适应区域生长的微型钻铣刀具磨损检测方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(12): 98-107.
- DENG Xiaopeng, WANG Yan, HONG Yu, et al. Wear detection for micro-drill and micro-milling tool via adaptive region growth algorithm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(12): 98-107.
- [21] 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.
- [22] 秦国华, 易鑫, 李怡冉, 等. 刀具磨损的自动检测及检测系统 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3332-3341.
- QIN Guohua, YI Xin, LI Yiran, et al. Automatic detection technology and system for tool wear [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3332-3341.
- [23] ZHANG Jilin, ZHANG Chen, GUO Song, et al. Research on tool wear detection based on machine vision in end milling process [J]. *Production Engineering*, 2012, 6(4): 431-437.
- [24] MOOK W K, SHAHABI H H, RATNAM M M. Measurement of nose radius wear in turning tools from a single 2D image using machine vision [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(3): 217-225.
- [25] JANSI S, SUBASHINI P. Optimized adaptive thresholding based edge detection method for MRI brain images [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2012, 51(20): 1-8.

(编辑 荆树蓉 刘杨)