

圆弧刃刀具刀尖圆弧精密测量

巫玲¹, 刘冬冬¹, 陈念年¹, 周鹏²

(1. 西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 圆弧刃刀具刀尖圆弧参数会影响加工尺寸精度、表面质量和刀刃耐用度, 研磨和测量的精度要求已达微米甚至亚微米级别; 针对其本底噪声强、圆弧刃直线刃过度不明显等问题, 提出结合形态学闭运算、滑动窗口三点定圆和空间矩法, 分步实现圆弧初、精定位; 实验结果表明, 算法具有较强的抗噪能力, 可快速对 0.2~0.8 mm 的刀尖进行直线刃与圆弧刃正确分离, 圆弧半径、圆度误差测量精度达亚微米量级, 角度测量精度达 0.1°。

关键词: 刀尖圆弧; 闭运算; 三点定圆; 亚像素检测; 空间矩

Circular Arc Measurement of Rounded Cutter

Wu Ling¹, Liu Dongdong¹, Chen Niannian¹, Zhou Peng²

(1. Department of Computer Science and Technology, SWUST, Mianyang 621010, China;

2. Department of Manufacture Science and Engineering, SWUST, Mianyang 621010, China)

Abstract: The parameters of circular arc of a rounded cutter affects the machining precision, surface roughness and cutter durability. Accuracy requirements of grinding and measuring of a cutter has reached micron order or even submicron. At present, the main problem is different background noises and unobvious transition of arc-edge and linear-edge. The paper introduces morphologic closing operation for noise reduction, uses circle determination with three points in the sliding window for rough location of the arc, and adopts spatial moment for sub-pixel precision. The results show that the proposed method is robust, and the separation of arc and line is fast and accurate for cutters of radius from 0.2mm to 0.8mm. The precision of arc radius and roundness error is submicron order, and the precision of arc angle is 0.1 degree.

Keywords: arc of a cutter; close operation; three-point circle; sub-pixel detection; spatial moment

0 引言

数控机床刀具刀尖处的转接圆弧过渡刃在切削加工中会影响加工尺寸精度、表面质量和刀刃耐用度。为保证零件加工精度, 必须对刀尖圆弧半径和刀具磨损进行补偿, 这是现代计算机数控系统重要功能之一^[1]。圆弧刃刀具刀尖圆弧半径、圆度误差是评定圆弧刃刀具研磨质量的重要指标。

实际生产中常用逆向测量法^[1-2], 通过加工零件反求刀具参数, 如加工特殊的零件(如圆锥面), 测量相关尺寸, 推算刀尖圆弧半径值。目前常用逆向测量工艺方法主要有 4 种, 倒角法最简单常用, 但计算精度为 0.05 mm, 仅适合低档车床和粗加工。

随着航空航天技术、国防工业、精密工程、先进制造业等尖端技术的飞速发展, 精密制造对刀尖圆弧测量的要求已经达到微米甚至亚微米的级别。此外, 摩擦学、表面学也开始将刀尖圆弧参数作为影响关键因素进行分析, 要求获得直观测量结果。

基于视觉检测的测量方法开始受到越来越多的研究者的重视^[3-6]。天津大学刘力双博士采用高斯曲线拟合法获得刀尖亚

像素边缘, 通过轮廓跟踪寻找特征点, 基于特征点进行刀具识别与几何参数计算。哈尔滨工业大学李增强博士采用原子力显微镜和带半径约束的最小二乘圆拟合方法实现圆弧刃金刚石刀具的圆度测量。江南大学的周洋基于面阵摄像机和微分逼近任何反求法研制出图像式刀调仪。

上述方法均需较多人工干预, 测试结果受刀尖放置角度、圆弧大小等因素影响较大, 常常只能检测到部分圆弧, 圆弧角度测量极不准确。这是由于圆弧刃刀尖显微图像具有 2 个显著特点:

1) 刀尖表面结构特征清晰, 存在大量明显的研磨痕迹, 如粗细不一、纵横交错的线条与孔洞, 随研磨工具与刀尖材料的不同而不同, 图像去噪平滑预处理后会仍存在大量干扰边缘。

2) 刀尖的直线刃与圆弧刃过度不明显, 不存在明显拐点, 圆弧难于准确拟合, 圆弧角度难于准确定位。

本文基于显微镜和机器视觉技术, 结合形态学闭运算、滑动窗口三点定圆和空间矩法, 提出一种精度达到亚微米量级的圆弧刃刀具刀尖圆弧精密测量技术, 使刀尖边缘提取不受本底噪声影响, 快速准确分离直线刃和圆弧刃, 最后对圆弧刃亚像素边缘点进行最小二乘圆拟合。

1 刀尖圆弧精密测量算法

1.1 刀尖圆弧精密测量总体设计方案

在圆弧刃刀具研磨和数控加工中, 需控制 3 个重要刀尖参

收稿日期: 2013-12-26; 修回日期: 2014-03-17。

作者简介: 巫玲(1982-), 女, 四川遂宁人, 讲师, 硕士, 主要从事视觉测量、图像分割方向的研究。

数: 圆弧半径 R 、圆弧角度 θ 和圆度误差 ΔR 。

上述参数可以用简单的几何结构图说明, 如图 1 所示, 其特点是^[3]: 半径小 (一般 $0.2 \sim 2 \text{ mm}$), 角度范围窄 (一般在 120° 之内), 圆度误差小 (研磨质量好时能实现 120° 内 ΔR 小于 $0.1 \mu\text{m}$, 60° 内 ΔR 小于 $0.05 \mu\text{m}$)。

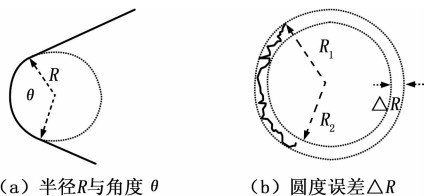


图 1 圆弧刀具刀具尖圆弧测量参

圆弧刀具刀具尖圆弧参数精密测量有 3 个问题亟待解决:

- 1) 消除研磨本底噪声影响;
- 2) 准确分离刀具尖直线刃与圆弧刃;
- 3) 圆弧亚像素参数测量。

针对上述问题, 将整个测量流程分为圆弧初始定位与亚像素精确测量两个过程, 算法流程如图 2 所示。

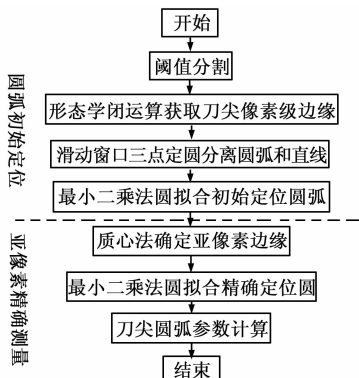


图 2 圆弧刀具刀具尖圆弧精密测量流程图

1) 圆弧初始定位: 首先将采集的显微图像 I 灰度化后自动阈值分割, 获得二值图 BW_1 ; 接着对 BW_1 进行形态学闭运算, 填充刀具研磨时形成的刻痕等缺口, 获得刀尖区域图 BW_2 和刀尖边缘 EG ; 然后设置半径为 win_r 的滑动窗口遍历 EG , 采用滑动窗口的起点、中点、尾点进行三点定圆的圆拟合, 统计局域半径方差分离 EG 中的圆弧 A 和直线 L ; 最后利用最小二乘法进行圆拟合, 获得圆弧的半径 R 、圆心 O 等参数。

2) 亚像素测量: 根据圆弧初始定位的圆弧参数, 设置搜索半径 sub_r , 沿圆弧法线方向, 采用空间矩法, 寻找圆弧的亚像素边缘点 EG_{sub} ; 对 EG_{sub} 进行最小二乘法圆拟合精确定位圆弧, 得到亚像素圆弧半径 R_{sub} 和圆心 O_{sub} ; 计算圆弧角度 θ 和圆度误差 ΔR 等其他刀尖圆弧参数。

1.2 获取刀尖像素级边缘

刀尖灰度显微图像二值化的阈值采用常用的最大类间方差法计算, 实验显示, 最大熵、阈值迭代、矩不变阈值计算等方法会获得相似的结果。

阈值分割结果如图 3 (a) 所示, 刀具研磨痕迹引起了二值图的孔洞和边缘的断裂。形态学闭运算通过先膨胀后腐蚀, 在结构上实现平滑边缘、填充缺口的作用。

数学形态学的基本运算是腐蚀 (E) 和膨胀 (D), 可分别定义如式 (1) 和 (2):

$$EhI(x) = \inf_{y \in h} I(x - y) \quad (1)$$

$$DhI(x) = \sup_{y \in h} I(x - y) \quad (2)$$

式中, I 为被处理区域, h 为结构单元, \inf 表取最小值, \sup 表取最大值。闭操作 (C) 可定义为式 (3):

$$ChI(x) = \inf \sup_{y \in h} I(x - y) \quad (3)$$

图 3 (a) 闭填充的结果如图 3 (b) 所示, 获取的刀尖的像素级边缘 EG 如图 3 (c) 所示, 为了结果直观可见, 将边缘绘于刀尖灰度图像上。



图 3 刀尖像素级边缘提取结果

1.3 滑动窗口三点定圆

刀尖圆弧精密测量的关键是正确分离圆弧刃和直线刃, 以提高最小二乘法拟合圆的精度。文献 [4] 提出了一种微分逼近几何反求法, 先将刀具轮廓粗略分段, 拟合直线, 计算每相邻两段小直线的夹角, 通过夹角的变化定位圆弧, 最后最小二乘法拟合得到圆弧圆心、半径等参数。

本文引入滑动窗口取代粗略分段, 提高后续圆弧刃、直线刃分离的精度。半径为 win_r 的滑动窗口在边缘 EG 上滑动, 使用滑动窗口的起点、中点、尾点进行三点定圆的圆拟合。如果该边缘段位于直线刃, 则拟合圆半径 R 极大; 当边缘段从直线刃逐渐过渡到圆弧刃, R 逐渐变小; 当边缘段位于圆弧刃, R 达到最小, 并保持稳定。

由于刀具边缘的不平滑性, 采用半径的局域方差实现圆弧刃和直线刃的分离。局域半径方差 VAR_{local} 的计算公式如式 (4) 所示, 其中 var_r 为统计半径。

$$VAR_{local}(x) = VAR(y)$$

$$s. t. y \in [x - var_r, x + var_r] \quad (4)$$

对 VAR_{local} 采用最大类间方差法计算的阈值二值化, 获得圆弧刃与直线刃交点, 分段进行直线和圆弧拟合。

1.4 空间矩法确定亚像素边缘点

亚像素技术可以突破 CCD 相机分辨率的限制, 是提高测量精度的热门研究方向。目前国内外研究的亚像素边缘检测理论与技术, 在数学上可以归纳为插值法、矩方法、拟合法 3 种类型^[7], 常用的算法有灰度矩、空间矩、高斯曲线拟合等。

高斯曲线拟合法认为边缘附近灰度值的差分沿梯度方向符合高斯分布, 在边缘处最大。考虑到计算效率, 常用二次曲线来代替高斯曲线。二次曲线 (最小二乘拟合) 一阶导数的零点位置即为亚像素点位置。

二次曲线拟合法是目前最常用的亚像素定位方法^[3,5-7], 其计算结果依赖于拟合半径的选择。以边缘点为中心, 沿梯度方向的取半径为 5 像素的窗口, 如果拟合窗口半径分别为 1 和 5 像素, 最小二乘拟合得到的二次曲线有显著差异, 计算出的

亚像素点坐标分别为 6.2615 和 5.9240 像素。如果实际边缘的灰度差分在拟合窗口两端恰好为 0，则可能无法拟合出二次曲线正确参数，矩方法可以很好的克服这些问题。

1984 年 Tabatabai 提出利用边缘灰度的前三阶矩进行亚像素检测，后 Lyvers 利用受坐标影响的边缘灰度空间矩实现亚像素定位。仿真实验表明，理想圆图像三种结果检测的亚像素边缘点完全相同，添加方差 σ 为 5、10、50、60 等不同强度的高斯噪声时，检测结果和真实边缘参数出现不同程度的偏差，如表 1 所示，空间矩鲁棒性最强，精度可达 0.05 像素。

表 1 三种亚像素边缘检测算法鲁棒性对比

亚像素边缘检测算法	真实半径 (像素)	半径相对差值(像素)			
		$\sigma=5$	$\sigma=10$	$\sigma=50$	$\sigma=60$
二次曲线拟合	150.421 3	0.000 05	0.000 10	0.564 99	1.447 33
灰度矩		0.003 80	0.018 63	0.687 10	0.721 88
空间矩		0.005 55	0.011 01	0.049 04	0.050 10

因此本文采用空间矩实现亚像素定位， p 阶空间矩定义如式 (5) 所示：

$$m_p = \frac{1}{n} \sum_{x=0}^{n-1} x^p f(x) \quad (5)$$

式中， $f(x)$ 为灰度一维分布函数，亚像素坐标 x_{sub} 为：

$$x_{sub} = (3m_2 - m_0) / 2m_1 \quad (6)$$

2 实验结果

为验证算法有效性，对一批标称圆弧半径为 0.3 mm、0.5 mm、0.8 mm 的 3 种刀尖采集显微图像，物镜放大倍率为 40，CCD 分辨率为 289 像素 * 352 像素，每像素 $4.45 \mu\text{m} \times 4.45 \mu\text{m}$ 。系统在 Intel Core i3 550 3.2 GHz 的计算机上测试，运行平台为 Win7。实验中，形态学闭运算的结构单元取直径为 10 像素的圆形，滑动窗口半径 win_r 为 60 像素，局域半径方差 VAR_{local} 的统计半径 var_r 为 30 像素。

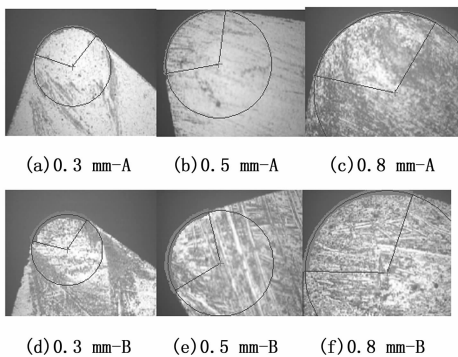


图 4 本文算法部分测量结果图

图 4 给出了具有不同纹理的刀尖的实验结果图，“.”表示圆弧亚像素边缘，其拟合结果绘制为蓝色圆，“+”为拟合圆心，用直线连接圆弧端点与圆心，直观显示圆弧角度。圆弧各参数统计如表 2 所示。可以看出，本文算法具有较强的抗噪能力 (图 4 (d) ~ (f) 具有不同强度、类型的研磨本底噪声)，边缘定位正确，能准确分离刀尖直线刃与圆弧刃 (即使

表 2 本文算法的刀尖圆弧参数测量结果

刀尖名	半径 (R,mm)	标称半径误差 (μm)	圆度误差 ($\Delta R, \mu\text{m}$)	圆弧角度 ($\theta, ^\circ$)
0.3A	0.304 2	4.224 1	9.2	107.691 4
0.3B	0.307 4	7.437 7	10.9	108.142 7
0.5A	0.504 1	4.126 1	11.2	107.262 3
0.5B	0.492 9	-7.083 3	11.7	107.914 6
0.8A	0.788 8	-11.925 99	12.6	108.143 6
0.8B	0.788 1	-11.470 35	10.9	107.424 2

有的刀尖存在缺口，如图 4 (d))，检测出的圆度误差、圆弧角度稳定；圆弧参数测量精度达到亚微米 (0.05 像素)。

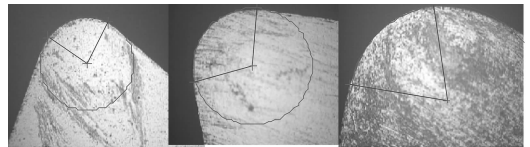


图 5 微分逼近几何反求法对比实验结果

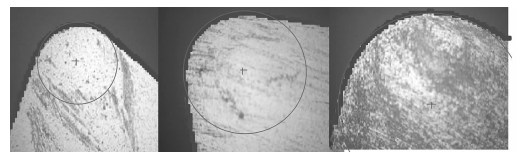


图 6 带半径约束的 hough 圆检测法对比实验结果

图 5、图 6、表 3 给出了另外两种算法的对比结果。由于这两种算法都只强调解决分离圆弧刃和直线刃的问题，因此都首先采用本文方法去除本底噪声、获得刀尖像素级边缘，并采用研磨痕迹、异常缺口较少的刀尖进行对比试验。

表 3 三种刀尖圆弧检测算法测量结果对比

算法	时间 /s	半径/ μm			圆度误差/ μm			圆弧角度/ $^\circ$		
		0.3A	0.5A	0.8A	0.3A	0.5A	0.8A	0.3A	0.5A	0.8A
本文算法	0.029	304	504	789	9	13	14	107.70	107.3	108.0
微分逼近几何反求	0.37	342	497	813	8	24	24	82.23	110.3	72.3
带半径约束的 hough 圆检测	1.42	292	499	801	25	19	43	96.24	102.3	90.2

微分逼近几何反求法对边缘采用滑动窗口进行分段直线拟合，根据拟合直线斜率的拐点定位直线刃和圆弧刃的分离点。图 5 中可以看出，此算法分离点定位准确性低，圆弧分离不完整，在刀尖 45° 倾角放置时效果最佳。图 5 (c) 处理误差来源于刀尖半径较大，导致直线刃不明显。带半径约束的 hough 圆检测法根据刀尖的圆弧半径标称值确定 hough 圆检测的半径范围，根据圆方程与边缘的最大匹配找到最佳圆。此方法不能定位圆弧刃与直线刃的过渡点，难于进行圆度误差、圆弧角度等参数计算，表 3 相应数据是采用手工寻找的最佳结果。由于采用半径约束，检测的半径更贴近标称值，但此半径可能偏离实

际值从而导致圆度误差较大。

表 3 可以看出, 微分逼近几何反求法和带半径约束的 hough 圆检测法测量的圆度误差和圆弧角度波动较大, 刀尖放置角度、刀尖半径会显著影响测量结果。相比之下, 本文算法测量的各刀尖圆度误差约 $10 \mu\text{m}$, 圆弧角度约 $107.7 \pm 0.5^\circ$, 更稳定、更符合刀具研磨实际, 侧面证明了本文算法的正确性。

从运行效率上, 由于微分逼近几何反求法需逐点进行直线拟合, 带半径约束的 hough 圆检测法需进行 hough 圆检测、寻找最佳拟合圆, 运行速度较慢。本文算法分离圆弧时采用三点定圆方法直接计算圆方程, 取代最小二乘圆拟合, 显著提高处理效率。

3 结束语

圆弧刃刀具刀尖圆弧参数会影响加工尺寸精度、表面质量和刀刃耐用度, 刀具研磨、精密制造、摩擦学、表面学分析等领域急需达到微米甚至亚微米的测量设备。

本文提出一种基于显微镜和 CCD 的测量方案, 采用滑动窗口三点定圆实现圆弧初始定位和空间矩法检测亚像素边缘, 利用最小二乘法进行亚像素边缘圆拟合, 实现精度达到亚微米量级的圆弧刃刀具刀尖圆弧精密测量。

算法采用形态学运算优化分割结果, 提取出完整的刀尖像素级边缘; 采用滑动窗口三点定圆法, 根据局域半径方差分离出直线刃和圆弧刃, 运算效率优于现有方法; 实验对比现有亚像素定位法, 采用鲁棒性更好的空间矩法, 计算亚像素边缘点; 最后对亚像素边缘进行最小二乘法圆拟合, 计算刀尖圆弧

各参数。

实验结果表明, 本文算法具有 3 个优点: 1) 能消除研磨本底噪声影响; 2) 准确分离刀尖直线刃与圆弧刃; 3) 快速准确实现圆弧亚像素参数测量。

目前, 该算法已成功运用于实际项目中, 软件性能指标可以达到: (1) 可测量 $0.2 \sim 0.8 \text{ mm}$ 的刀尖 (更大的需更换物镜以获得更大视场); (2) 半径、圆度误差测量精度达亚微米量级, 角度测量精度达 0.1° 。

参考文献:

- [1] 程 玉, 黄 康. 数控加工中刀尖圆弧半径补偿与刀具磨耗补偿实例分析 [J]. 机床与液压, 2011, 39 (2): 34-36.
- [2] 周建来, 杜玉玲, 陈书法, 等. CNC 编程中刀尖圆弧半径的测量方法和加工精度 [J]. 新技术新工艺, 2004, (8): 22-24.
- [3] 刘力双, 王宝光, 张 挑, 等. 刀具预调测量仪系统的研究 [J]. 制造技术与机床, 2005, (10): 67-69.
- [4] 李增强. 圆弧刃金刚石刀具刀尖圆弧的机械研磨及其检测技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [5] 周 洋. 图像式刀调仪视觉检测技术研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [6] S Yaceng, C Jing, T Junwei. The Research of the Measures Algorithm of the Parameter of the Cutter [J]. Image, Graphics and Signal Processing, 2011, (1): 45-52.
- [7] 尚雅层, 陈 静, 田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法 [J]. 计算机应用, 2011, (1): 179-181.
- [4] 王 岗, 李 莘, 吴春邦. 星地双向时间比对技术中伪距及其时刻的处理方法 [J]. 空间电子技术, 2007, 4 (2): 35-56.
- [5] 龙运军, 陈英武, 邢立宁, 等. 导航卫星上行注入任务调度模型及启发式算法 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 25 (2): 34-39.
- [6] Felbatch D, Heimbueger D, Herre P, et al. Galileo Payload 10.23 MHz Master Clock Generation with a Clock Monitoring and Control Unit (CMCU) [A]. 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum [C]. 2003: 583-586.
- [7] 崔小准, 米 红, 李 懿, 等. 一种全球定位系统卫星 C/A 信号通道绝对时延标定算法 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46 (11): 1843-1847.
- [8] Cui X Z, Li P, Hu C B, et al. Delay calibration algorithm for BOC channel of RNSS using partial correlation [A]. IEEE 14th International Conference on Communication Technology [C]. Chendu, 2012: 1344-1348.
- [9] 崔小准, 李 懿, 武向军, 等. Measuring absolute delay of RNSS signal channel using digital envelope detection [J]. Journal of Donghua University, 2013, 30 (2): 114-117.
- [10] 崔小准, 李 懿, 刘庆军. 导航卫星导航信号频谱自动检测与判读软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 4-6.

(上接第 2342 页)

2) 利用导航信号接收机接收和解调导航信号, 提取导航电文, 通过控制计算机完成导航卫星上行注入性能中信息处理功能的星地大环路比对, 实现整星对上行注入信号信息处理的正确性验证测试;

3) 控制计算机控制独立的干扰信号发生器, 干扰信号的期望特征可以通过控制计算机软件更改, 满足测试需求的变更和扩展;

4) 注入性能测试中电文信息的生成和比对都是通过控制计算机的软件来实现的, 可以通过修改测试软件来满足新的测试要求, 便于测试系统的升级改造。

参考文献:

- [1] 金国平, 王茂磊, 范建军, 等. GPS 上行注入系统探析及思考 [J]. 计算机与网络, 2012, 38 (16): 48-51.
- [2] Journ S, Poumailloux J, Piéplu J M, et al. Producing the Galileo Services From the Ground Mission Segment (GMS) [A]. ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division [C]. Fort Worth, 2006: 504-519.
- [3] 吴海玲, 郭树人, 樊士伟. 无源卫星导航系统星地双向无线电时间比对实现 [J]. 全球定位系统, 2003, 28 (5): 36-40.