

# 特种头型微钻视觉检测方法研究

张舞杰<sup>1,2</sup>, 叶 锋<sup>1</sup>, 谢长贵<sup>1</sup>, 邓 华<sup>1</sup>

(1. 东莞市睿华智能科技有限公司, 广东 东莞 523808;

2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

**摘要:** 微钻的生产制造过程中, 检测是一个至关重要的环节; 面对市场对于特种头型微钻日益增长的需求, 提出一种针对特种头型微钻的视觉检测方法; 该方法通过拟合直线和拟合圆对刃面直径和芯厚的尺寸进行了测量, 同时通过一种改进的直线拟合方法和 NURBS 样条曲线拟合方法, 拟合出了刃面的标准轮廓, 从而实现对微钻缺陷有无判断以及大小的计算, 最后设计了可视化的软件进行实验; 实验结果表明: 各种头型微钻的尺寸参数测量重复误差在 0.02% 以内, 缺陷参数测量重复误差在 2% 以内; 提出的方法具有可行、可靠、精确的特点, 能快速且有效地满足特种头型微钻的视觉检测。

**关键词:** 微钻; 直线拟合; 曲线拟合; 视觉检测

## Research on Visual Inspection Method of Special Head Micro Drill

Zhang Wujie<sup>1,2</sup>, Ye Feng<sup>1</sup>, Xie Changgui<sup>1</sup>, Deng Hua<sup>1</sup>

(1. Dongguan Ruihua Intelligent Technology Limited Company, Dongguan 523808, China;

2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In the manufacturing process of micro-drills, inspection is an essential part. Facing the growing need of special head micro drill, a visual inspection method is proposed. Shape dimension including blade diameter and core thickness is measured by line and circle fitting, then standard profile of the blade is fitted by an improved line fitting method and NURBS spline curve fitting method, which can be used in the judgment of the defects and the calculation of their size. In the end, a visible software is designed to test the algorithm and the result shows the algorithm, which is valid, reliable and accurate, can meet the need of the inspection of special head micro drill. The measurement repeatability error of dimensional parameters of various head-type micro drills is within 0.02% and defect parameter measurement repeatability error of various head-type micro drills is within 2%.

**Keywords:** micro drill; line fitting; curve fitting; visual inspection

## 0 引言

随着科学技术的不断发展和人们生活水平的提高, 传统头型的微钻已经不能满足工业发展的需求。所以特种头型的微钻产品的制造和生产已经成为微钻加工的一种必然趋势。在其制造过程中, 对于尺寸和缺陷的检测是一道不容忽视的环节。传统的微小零部件的尺寸检测方法大多是通过人工借助测量工具(如千分尺、显微镜等)进行检测的, 但是人工检测方法存在效率低、漏检率与误检率高和检测精度低等局限性, 已逐渐被如激光检测、射线检测和机器视觉检测等非接触式检测方法所取代。基于机器视觉的非接触检测技术以其高效、高精、准确、省力等优势被广泛应用于工业监控、产品尺寸检测、产品缺陷检测及卫星侦察等领域中。

视觉检测对比传统的人工检测方式主要有以下优势: 1) 可以实现对生产过程的自动化和智能化; 2) 检测速度更快同时检测精度更高; 3) 可以重复性地做同一动作的

工作, 解决了人工检测出现的疲劳检测导致误差增大的问题, 大大地提高了检测的效率; 4) 可以非接触地完成生产的过程, 减少了人工在危险工序中的参与, 从而提高了生产过程中要求的安全性。所以, 为了提高产品的质量和生产效率, 采用视觉检测代替人工本检测具有重要的实用价值。

本文首先对特种头型微钻的种类以及定义进行了系统的介绍, 同时对影响其工艺特性的重要刃面参数进行定义的阐述, 其次详细地介绍了针对于特种头型微钻刃面视觉检测的算法的实现原理以及相应的图像处理步骤, 最后设计出了可视化的图像处理软件, 同时通过实验验证了该算法的可行性以及准确性, 完全满足实际生产加工的需求。

## 1 特种头型微钻及其重要的刃面参数

### 1.1 特种头型微钻种类

特种头型的微钻主要包括 4 种: 月牙型、CB 型、A 型和长条型, 如图 1 所示。

月牙型、CB 型、A 型和长条型的命名主要是根据其刃面的形状来确定的。微钻头型的不同, 在结构上会对微钻的实际性能产生不一样的影响, 合理的头型能够使钻头具有较好的刚性、出色的排屑能力以及较长的寿命。所以针对特定的场合选择合适的特种头型微钻进行加工是一件十

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-10-17。

基金项目: 东莞市引进创新创业领军人才计划资助(201906246)。

作者简介: 张舞杰(1970-), 男, 湖南省长沙市人, 博士, 副研究员, 主要从事图像处理、模式识别和过程控制方向的研究。

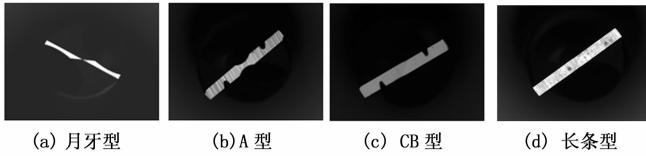


图 1 几种常见的特种头型微钻

分必要的事。

### 1.2 特种头型微钻种类

微钻刃面检测参数主要包括尺寸和刃面缺陷。尺寸的测量主要包括刃面的外径以及芯厚的大小，其定义如图 2 所示。

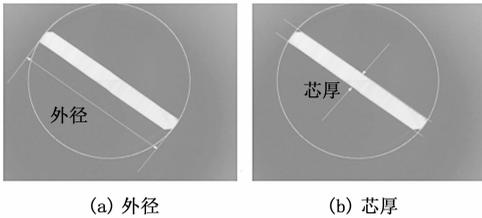


图 2 微钻尺寸测量参数

外径和芯厚的实际尺寸必须在公差范围之内，过大或者过小都会影响微钻的性能。尺寸的测量主要采用亚像素的边缘提取和直线拟合和圆拟合，在求得实际边缘轮廓的基础上进行计算得到。

在微钻的生产加工过程中，由于偶然或者人为的因素，往往会在刃面上产生一些加工缺陷，而这些缺陷是不能被允许的。所以后续的检测环节就显得尤为重要。微钻的刃面常见的缺陷种类主要包括圆角、缺口和研磨不足等。几种常见的缺陷如图 3 所示。

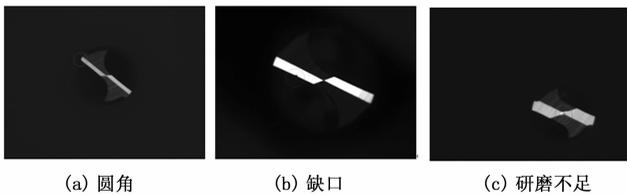


图 3 几种常见的微钻刃面缺陷

## 2 视觉检测算法及其实现

根据前面可知，特种头型的微钻与普通头型的微钻由于结构上的差异，相应地，视觉检测算法也要因此做出对应的改变，下面就对特殊头型的视觉检测方法进行分析。

### 2.1 刃面尺寸测量

特种头型的尺寸测量主要包括外径和芯厚这两个参数。为求得这两个重要的尺寸参数，需要对从工业相机获得的清晰的微钻刃面图像进行亚像素轮廓提取，下面对所使用的具体图像处理方法进行详细的介绍和说明。

首先，为了获得清晰的噪点少的微钻刃面图像，在进行正式的图像处理之前，需要对采集上来的原图进行预处理滤波。预处理滤波的方式主要分为：中值滤波、高斯滤

波、均值滤波等。在实际的微钻生产过程中，出现的多为高斯噪声，所以这里采用高斯滤波对图像进行预处理，如图 4 所示。

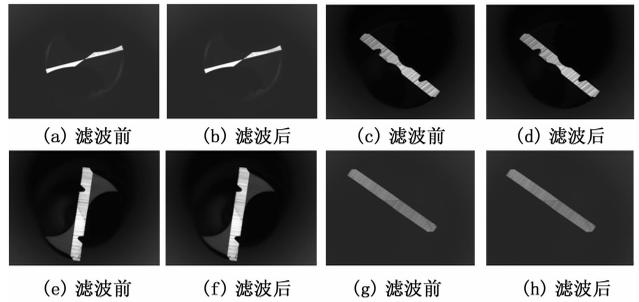


图 4 特种头型微钻滤波前后对比

为了减少图像亮度和对比度的影响，这里采用大津法即最大类间方差法去求全局阈值。针对图 4 的图像，运用大津法求出其最合适的分割阈值，之后对其进行阈值分割，则可得到刃面的区域，如图 5 所示。

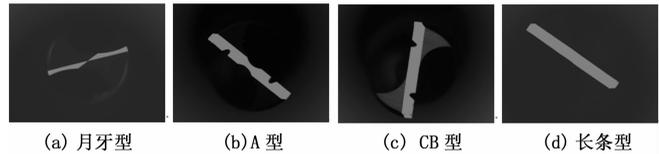


图 5 阈值分割

之后，为求得微钻外径尺寸，需要对得到的刃面区域即感兴趣区域进行最大外接圆拟合。RANSAC 圆拟合法是通过进行多次的随机抽样来进行数学模型参数的估计的拟合算法，鲁棒性极强。其基本的步骤为：

首先，我们对提取到的所有轮廓点  $n$  中无差别地任意获得 3 个轮廓点，利用平面上 3 个轮廓点的坐标就可以确定一个圆，进而确定此圆数学模型中需确定的 3 个变量参数。

其次，通过获得全部圆轮廓上的点以及 3 个变量参数之间的拟合残差，对比之前所设阈值  $E$ ，如果残差比所设阈值  $E$  小，则可以将这个轮廓上的点当作内点，此时内点的个数为  $K$ 。

然后，当内点的个数增加到等于或者大于所设阈值  $e$  的时候，则表示此算法可以确定最合适的拟合圆所需的变量参数了。之后通过对之前所保存的内点坐标进行最小二乘法数据处理，即可以得到最后的合适的拟合圆方程。

最后，如果内点的个数小于所设阈值  $e$  的时候，算法继续进行，重复以上的算法步骤，直至找到正确拟合圆的模型为止，算法结束；如果重复迭代  $m$  次之后还是未能确定模型参数，则提前结束算法，拟合失败。

其中，所设阈值  $E$  和  $e$  可以根据实际所进行的实验结果来最后决定其数值的大小，而且重复迭代次数的大小确定可以根据经验和先前理论推敲得到。

由已知文献参考可知，RANSAC 算法拟合失败的概率公式为：

$$1 - P = (1 - \omega^3)^m \quad (1)$$

其中:  $p$  代表算法拟合成功的概率大小,  $\omega$  代表随机地在全部提取的圆的轮廓点中挑取一个点, 而这个点恰好为内点的概率大小。因此, 如果要获得足够高的算法拟合成功率, 则相应的迭代次数需满足以下条件:

$$m \geq \frac{\log(1-p)}{\log(1-\omega^3)} \quad (2)$$

通过拟合得到各种头型的微钻的最大外接圆, 如图 6 所示。

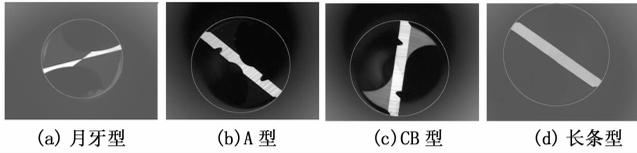


图 6 外径求取

同理, 为求得微钻的芯厚大小, 需要同 ROI 求取其对应的外接矩形, 矩形的宽度即为所求的芯厚。通过相关计算, 得到如图 7 所示的 4 个外接矩形:

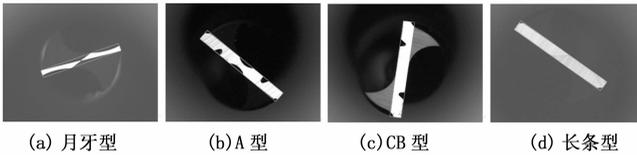


图 7 芯厚求取

## 2.2 刃面缺陷检测

刃面缺陷检测主要是缺口以及圆角的检测, 为此需对刃面的轮廓进行亚像素级的提取和拟合。除第 4 种长条形的微钻之后, 其他 3 种头型的边缘轮廓都是直线和曲线的组合, 所以在实际的计算过程中, 图像处理手段相对复杂一些, 需要对直线和曲线轮廓分别进行亚像素的轮廓提取。

### 2.2.1 改进的直线拟合方法

针对图像处理算法中的直线拟合, 一般有: 最小二乘法、梯度下降法以及高斯牛顿法。其中, 最小二乘法使用最为广泛。最小二乘法即最小平方方法, 它根据数据的最小化误差的平方来获得数据的最适合函数匹配。

用最小二乘法来拟合直线, 主要的思路是找到一条直线, 使得所有已知的轮廓点到这条直线的欧氏距离的和最小即点到直线的误差平方和最小。因此, 其基本的步骤为: 首先假设直线方程, 用斜率和截距作为变量表示; 然后获得轮廓点的坐标; 之后计算点到直线的误差平方和; 最后根据极值定理, 让误差方程一阶导数等于 0 处取极值即分别对斜率和截距求导, 即可获得直线的斜率和截距, 直线方程也随之解得。

RANSAC 估计即随机采样一致性估计。这种具有鲁棒性的估计方法最早由 Fischler 和 Bolles 提出的。最开始是用来解决计算机视觉中关于位姿的估计问题, 如今被广泛地推广到对于已知模型的参数估计问题当中。对于直线拟合中使用 RANSAC 估计, 其主要的步骤有两条: 第一是在已

知的轮廓点中随机选取两个点, 由这两个点确定一条直线; 第二是通过使用几何距离获得最大一致集最佳的拟合直线, 以此作为最后的拟合直线。

具体来说就是, 首先随机选择两个点 A1 和 B1, 由这两个点的坐标就可以确定直线的方程中两个变量参数的大小, 从而获得直线方程; 然后计算其他剩余的轮廓点到这条直线的距离  $D$ , 在此之前先设置一个距离的阈值  $N$ , 判断  $D$  与  $N$  的大小关系, 等于或者小于所设阈值则将点视为内点, 保存内点的个数; 之后再随机选择两个点 A2 和 B2, 统计内点个数, 以此类推; 选取内点个数最大的点集作为最大一致集, 然后利用这最大一致集中的点拟合直线。

对于特种的微钻刃面图像, 由于刃面形状结构的复杂, 单纯地通过最小二乘法进行拟合直线, 很多边缘轮廓末端的干扰像素点也会被提取到, 导致拟合出来的直线精度不高, 所以这里使用改进的直线拟合方法进行拟合。算法的主要思路为: 首先使用 RANSAC 直线拟合算法进行第一次的直线拟合, 过滤掉干扰边缘线段和干扰点, 然后再对这些筛选后的轮廓点进行最小二乘法直线拟合。实验表明, 运用改进的直线拟合方法得到的拟合直线比较接近实际的轮廓形状, 为之后的图像处理减少了不必要的麻烦。拟合的结果如图 8 所示。

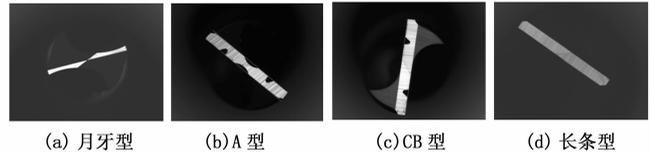


图 8 改进的直线拟合

### 2.2.2 样条曲线拟合

构造拟合曲线, 除了最常见的最小二乘法之外, 为了拟合的精度, 通常需要对曲线轮廓进行分段拟合即在每一段分段中, 用较低次的多项式作为此段的拟合曲线, 而且这些分段多项式的曲线的分界点还是光滑过渡的, 这就是样条曲线拟合了。

在实际的处理中, 我们可以将曲线近似的看成一条非均匀有理  $B$  样条曲线即 NURBS 曲线拟合处理。阶数为  $N$  的 NURBS 曲线  $C$  的定义为:

$$P(K) \geq \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,m}(K) R_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,m}(K) R_i} \quad (3)$$

其中:  $P(K)$  为曲线上的位置向量,  $N_{i,m}(K)$  为  $m$  次样条基函数。基函数可以通过递推公式来进行定义:

$$N_{i,0}(K) = \begin{cases} 1 & (K_i \leq K \leq K_{i+1}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$N_{i,m}(K) = \frac{(K - K_i) N_{i,m-1}(K)}{K_{i+m} - K_i} + \frac{(K_{i+m+1} - K) N_{i+1,m-1}(K)}{K_{i+m+1} - K_{i+1}} \quad (4)$$

其中:  $m \geq 1, P_i$  为控制点,  $R_i$  为权因子,  $K$  为节点矢量。

特殊地，如果曲线采用三次 NURBS 形式表示时，第  $i$  段曲线可以写成下列矩阵的形式：

$$P_i(t) = \frac{\sum_{j=i-3}^i w_j d_j N_{i,3}(u)}{\sum_{j=i-3}^i w_j N_{i,3}(u)} = \frac{[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} d_{i-3} \\ w_{i-2} d_{i-2} \\ w_{i-1} d_{i-1} \\ w_i d_i \end{bmatrix}}{[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} \\ w_{i-2} \\ w_{i-1} \\ w_i \end{bmatrix}} \quad (5)$$

其中： $t \in [0,1], i = 3, 4, \dots, n$ ，整理上式可以得到：

$$P_i(t) = \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3}{C'_0 + C'_1 t + C'_2 t^2 + C'_3 t^3} \quad (6)$$

其中： $t \in [0,1], i = 3, 4, \dots, n$ 。由于控制点  $d_i$  和权因子  $w_i$  都是已知的，而且  $M_i$  只与节点向量有关，所以  $C_i$  是确定的，所以整个曲线可以通过上式递推得到。

利用 NURBS 曲线拟合法，对各种头型的微钻刃面曲线轮廓进行拟合，得到的结果如图 9 所示。

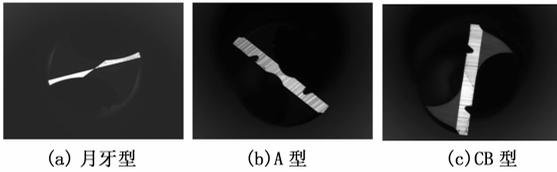


图 9 样条曲线拟合

在进行了粗大误差点去除之后，NURBS 曲线拟合后得到标准轮廓，之后再跟实际提取的轮廓进行对比，就可以在微钻曲线轮廓部分的缺口最大值、圆角的求法与缺口类似，只是计算大小的方式从拟合轮廓与实际轮廓的最大距离转化为外接圆上的点与刃面最远端的轮廓间的距离。

### 3 实验结果分析

实验中为验证视觉检测算法的可行性，选择月牙型、A型、CB型以及长条型的微钻，对每种头型的微钻，改变 10 次刃面角度之后，对其刃面图像进行采集，重复测试 10 次外径、圆角以及缺口值，然后保存；依托图像处理算法，设计专门的图像处理软件，对这些采集到的图片进行手动检测，检测结果可以直接显示到软件界面上；最后，保存数据结果，将结果与人工检测得到的数据结果进行对比，从而得到验证。实验的部分结果如图 10 所示。

其中，各种头型的微钻 100 次重复测量，得到的数据结果对比如表 1~4 所示。

表 1 月牙型

测试项目	最大最小差值	均值	方差	实际值/pixel
外径	2.32	2 301.87	0.68	2 300
圆角	0	0	0	0
缺口	1.1	9.5	0.58	9.0

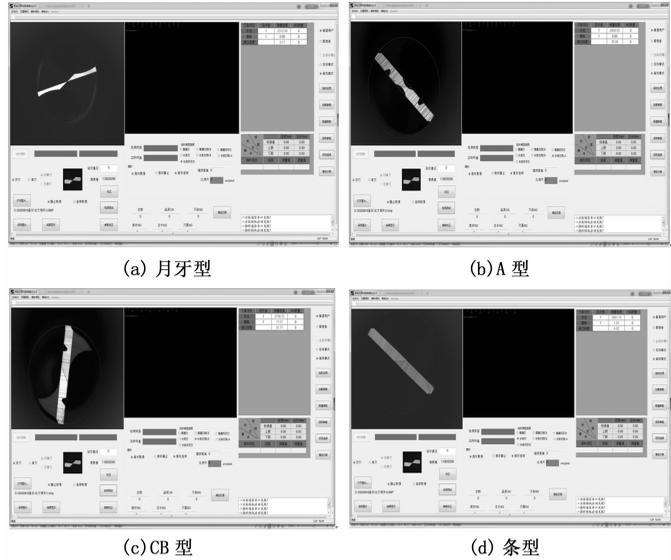


图 10 几种头型微钻的实验结果

表 2 A 型

测试项目	最大最小差值	均值	方差	实际值/pixel
外径	1.70	2 800.34	0.56	2 800
圆角	0	0	0	0
缺口	1.96	26.12	0.55	25

表 3 CB 型

测试项目	最大最小差值	均值	方差	实际值/pixel
外径	1.32	2 799.12	0.42	2 800
圆角	1.5	13.05	0.45	13
缺口	1.96	26.12	0.55	25

表 4 长条型

测试项目	最大最小差值	均值	方差	实际值/pixel
外径	1.13	3 001.09	0.41	3 000
圆角	0.5	4.02	0.32	4
缺口	0.4	1.05	0.25	1

实验结果表明，视觉检测算法能够将已知的缺陷种类全部检出，同时对于尺寸的测量也满足生产生活的实际要求。

### 4 结束语

针对特种头型微钻不同于普通微钻的结构特点，本文提出一种尺寸测量和缺陷检测的视觉算法。对于微钻的尺寸测量：首先通过高斯滤波预处理，获得干扰较少的微钻刃面图像；然后通过改进的直线拟合方法和圆拟合方法，提取边缘轮廓并进行拟合；最后计算最大外接圆的直径得到外径，计算拟合后矩形的宽度得到芯厚。对于微钻的缺陷检测，在同样的预处理之后，通过 NURBS 样条曲线拟合和直线拟合，获得刃面轮廓中的曲线轮廓，通过比较与实际轮廓的差异，获得最大的缺口值，同理得到圆角的大小。

(下转第 47 页)