

DOI: 10.7652/xjtuxb201912006

像素矩阵法获取整体式立铣刀 容屑槽端截形的研究

游明琳^{1,2}, 姚斌¹, 王迎全¹

(1. 厦门大学航空航天学院, 361005, 福建厦门; 2. 贵州师范大学机械与电气工程学院, 550014, 贵阳)

摘要: 以螺旋运动包络法和数学形态学二值图像的处理算法为基础,提出了一种方便快捷准确求取整体铣刀容屑槽端截形的像素矩阵法。该方法首先将砂轮回转面离散成点云后在刀具坐标系下进行包络运动,截取砂轮回转面离散点包络运动在刀具端面上留下轨迹的点云数据,将其转化成像素点,利用数学形态学对该二值像素点图像进行膨胀和腐蚀算法提取截形边界,对所提取边界进行平滑处理和插值,得到高精度的容屑槽端截形。该方法无需解析法求解非线性方程获取接触线的过程,避免了解析法的缺点(计算复杂和有异常解),且提取边界的廓形能满足计算精度要求又直观,是理论上获取刀具容屑槽端截形、分析刀具相关参数的新方法,尤其适用于分析成型刀具包络加工螺旋面。

关键词: 螺旋运动;数学形态学;整体铣刀;端截形;包络

中图分类号: TH128;TP391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0038-08

Pixel Matrix Method for Obtaining Cross Section of End-Mill Flutes

YOU Minglin^{1,2}, YAO Bin¹, WANG Yingquan¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550014, China)

Abstract: Based on the spiral motion envelope method and the binary image processing algorithm of mathematical morphology, a convenient, fast and accurate pixel matrix method for calculating the section of end-mill flute is proposed, in which the grinding wheel surface is discretized into point clouds to perform envelope motion in the tool coordinate system. The data of point clouds left by the envelope motion of all grinding wheel discrete points on the tool face are intercepted, and then converted into a binary image. The mathematical morphology is employed to extract the truncation boundary of the binary image with expansion and erosion algorithm, then to smooth and interpolate the extracted boundary to obtain high-precision flute profile. This method does not need to solve the non-linear equation by analytic method for obtaining the contact line, avoids the shortcomings in the analytic method, such as complicated calculation and abnormal solution, and extracts the profile points of the boundary to meet the requirements of calculation accuracy and intuition. This is a new method for obtaining the cross section of flute and analyzing related tool parameters theoretically, especially for analyzing the envelope of helical surface.

Keywords: spiral motion; mathematical morphology; end mill; cross section; envelope

收稿日期: 2019-04-10。 作者简介: 游明琳(1979—),男,博士生;姚斌(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 工信部 2018 年智能制造新模式应用资助项目(工信部联装[2018]265 号)。

网络出版时间: 2019-08-13 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190813.0939.002.html>

整体式立铣刀因具备良好的切削加工性能,被广泛应用于航空航天、船舶制造、汽车制造和模具生产等行业中,尤其是具有复杂型面零件的高速高精度加工中^[1]。由于整体式立铣刀本身复杂的螺旋空间几何形状,造成其磨削加工工艺复杂且磨削生产效率低^[2]。为减少整体式立铣刀的研制周期和试制成本,一般需要通过建模仿真的方式对刀具进行预先分析和计算,在整体式立铣刀各结构的建模与加工中,容屑槽尤为复杂和繁琐^[3]。要确保立铣刀的切削性能,必须保证螺旋槽的前角、芯径以及槽宽等刀具主切削刃上的结构参数,为了能正确分析和计算这些重要参数,可先精确获取容屑槽截形轮廓再求取相关参数,或准确对整体式立铣刀容屑槽进行建模再测算相关参数^[4]。目前,国内外专家学者关于容屑槽建模及重要结构参数求解主要提出了3种方法:解析法、布尔运算法和图形法^[5]。

(1)解析法是以啮合原理为核心,通过砂轮与被磨刀所做包络运动的相对运动关系,求出砂轮与整体式立铣刀容屑槽之间的瞬时接触线方程,将此接触线再绕整体式立铣刀轴线做螺旋参数为 p 的螺旋运动,即可求得容屑槽曲面方程,若将接触线投影到立铣刀端截面,即可得到容屑槽端截形^[6-7]。文献[8]基于啮合原理接触线方程的概念和螺旋面理论,较系统地阐述了螺旋线、螺旋面和圆螺旋面等建立几何方程的方法。文献[9-10]通过将整体式立铣刀容屑槽用相切圆弧进行简化,构建了容屑槽径向截面线模型的近似解析表达;文献[11-12]详细介绍解析法在刀具加工和建模的应用。

(2)布尔运算法主要是借助于三维建模软件的布尔运算功能,以砂轮为“刀具”,以被磨刀具为“目标”体,基于三维建模软件的二次开发,按照砂轮加工轨迹进行细分,不断调整砂轮姿态,循环进行砂轮与被磨刀具之间的布尔减运算操作。文献[13]利用二次开发技术,在NX UG中获得了容屑槽的模拟模型,并定义了前刀面前角、芯径等刀具几何参数。文献[14]根据实际槽形的磨削过程,提出了通过布尔减运算方法来模拟开槽磨削加工,从而利用已知的砂轮几何外形得到螺旋槽模型。文献[15]对被磨刀具的横截面进行动态布尔运算,通过横截面间的平铺来重建容屑槽三维模型。

(3)图形法主要是将砂轮进行离散化表达,然后根据砂轮与被磨刀具之间的空间位置几何关系,得到描述容屑槽形状的离散点,并取外边界点作为容屑槽轮廓点。文献[16]将砂轮沿轴向离散为多层具

有不同直径的薄片砂轮,依次计算每片砂轮离散单元,同时将被磨刀具沿径向也进行离散化,根据包络运动中砂轮与被磨刀具的空间位置几何关系,得到加工过程中每薄片砂轮圆盘单元和被磨刀具圆柱离散化单元之间的交点,取最外边界点作为容屑槽轮廓点。文献[17]将容屑槽刃磨过程转化为离散点云处理,并将立铣刀端面离散为一系列圆环,通过这些离散圆环内边界点的计算获得容屑槽端面轮廓。

综上所述,解析法是基于复杂的数学方程式,约束条件也用数学模型描述,求解精度高,无需过多迭代运算。由于求解的接触线方程过于复杂,经常遭到数值解计算复杂、非线性和稳定性等方面的问题,特别当砂轮轮廓上某点不存在法线时,将无法求解。另外,若砂轮轮廓存在圆弧等二次曲线,需求解超越方程,也无法得到精确的解析解。布尔运算法需要按照加工轨迹细分,不断调整砂轮与被磨刀具之间姿态连续进行布尔运算操作,从而获得容屑槽三维模型,因此执行计算过程非常浪费时间,并且模型的精度与细分数直接相关,细分越密精度越高,执行时间就越长。另外,由于模型是一系列间断的布尔减运算,在容屑槽三维模型表面会产生微小锯齿,且很少能采用插值或拟合方式进行优化,所以该方法的精度和效率都不高,并且所生成的模型不能直接用于CAE(计算机辅助工程)计算分析。图形法所采用的几何理论简单,几乎能适用于任何砂轮轮廓形状,但每个离散点的获取都需要大量的迭代运算,所以识别或提取外边界点即容屑槽廓形变得比较困难。不少学者对图形法的廓形识别和提取方面不断进行创新性研究。文献[18]提出径向射线搜寻法(RRS),该方法仅需定义刀具(可为圆柱型齿轮或成形砂轮)及加工路径,不需通过传统复杂的啮合方程推导,也无需求解刀具的过切参数范围即可求解出精确的工件齿形。文献[19]提出数字图形扫描法(DSG),该方法是成形加工刀具的模拟方法,能够避免传统平面啮合理论中复杂的解析计算过程,通过捕捉屏幕像素点阵中指定颜色的扫掠面的临界像素点所在的坐标值,从而得到扫掠面轮廓的数据。

本文提出了一种以螺旋运动包络法和数学形态学二值图像的处理算法为基础,能方便快捷并准确地获取整体铣刀容屑槽端截形的像素矩阵法,旨在避免复杂的解析法(接触线法)计算,又避免三维软件的布尔运算。本文方法直接根据砂轮与被磨刀具的包络运动建立了共轭运动方程,生成包络曲线簇,再截取其在端截面($z=0$)留下的轨迹点,然后转化

成二值图像;利用数学形态学对该二值图像进行膨胀和腐蚀算法操作,提取该截形边界,再通过矩阵运算还原边界像素点所在的坐标值,从而获取容屑槽的截面轮廓数据点;最后进行平滑处理和插值,得到高精度的容屑槽截形,进而可以完成后续刀具结构参数的测算等相关操作。该方法能够避免传统啮合理论中复杂的解析计算过程,又避开了布尔算法低效率的缺点,能解决砂轮磨削加工刀具容屑槽求解的问题,是图形法又一获取刀具容屑槽端截面廓形的创新研究和应用,可为后续计算刀具容屑槽的相关重要参数提供方便。

1 砂轮磨削容屑槽包络原理

建立被磨刀具坐标系 $[o;x,y,z]$ 和砂轮坐标系 $[o';X,Y,Z]$,如图1所示。其中砂轮轴线和被磨刀具轴线间的夹角为 Σ (称安装角),两轴线间的最短距离为 a (称中心距), x 轴与 X 轴线间的最短距离为 e (称偏心距)。

以平砂轮(1A1砂轮)的回转面加工螺旋面为例,首先在砂轮坐标系 $[o';X,Y,Z]$ 中建立砂轮回转面方程

$$\left. \begin{aligned} X_G &= R\cos\varphi_G \\ Y_G &= R\sin\varphi_G \\ Z_G &= t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: R 为砂轮半径; $\varphi_G \in [-\pi, \pi]$; $t \in [0, b]$; b 为砂轮厚度。将 φ_G 和 t 进行离散化,则砂轮回转面为离散的点云。

根据变换关系可得到砂轮回转面点云转换到被磨刀具坐标系 $[o;x,y,z]$ 的方程为

$$\left. \begin{aligned} x_G &= a - R\cos\varphi_G \\ y_G &= -e - R\sin\varphi_G \cos\Sigma - t\sin\Sigma \\ z_G &= -R\sin\varphi_G \sin\Sigma - t\cos\Sigma \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

整体式立铣刀容屑槽在刃磨过程中,砂轮相对立铣刀做螺旋运动,即在被磨刀具坐标系 $[o;x,y,z]$ 下,令砂轮回转面点云绕被磨刀具轴线 z 做等导程螺旋运动。设 θ 为螺旋运动参数(砂轮绕铣刀轴线转过的角度), p 为螺旋参数,可求得在刃磨过程中砂轮轮廓面点云形成的曲线簇方程为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

用垂直于刀具轴线的平面 $z=0$ 截取螺旋槽点云形成的曲线簇,获得曲线簇在该平面上留下的点云,将 $z=0$ 代入式(4),求得 $\theta = -z_g/p$,进而可求得砂轮轮廓磨削螺旋槽在 $z=0$ 平面留下的端截形表达式为

$$\left. \begin{aligned} x &= x_g \cos\theta - y_g \sin\theta \\ y &= x_g \sin\theta + y_g \cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(5)即可得到砂轮回转面点云在被磨刀具坐标系下包络刀具容屑槽的端截面点云。

2 数学形态学二值图像理论

数学形态学是图像处理中被广泛应用的技术,主要用于从图像中提取对表达或描绘区域形状有意义的图像分量,它以几何学为基础,着重研究图像的集合结构,使后续的认识工作能够抓住目标对象最为本质的形状特征,如形状识别、边缘检测、纹理分析、图像恢复和增强等^[20]。数学形态学图像处理的基本思想是,利用一个结构元素去探测一个图像,看是否能够将这个结构元素很好地填放在图像内部,同时验证所填放结构元素的方法是否有效^[21]。在不同的应用场合,结构元素的选择及其相应的处理算法是不一样的,对不同的目标图像应该设计不同的结构元素和不同的处理算法。二值图像的基本形态学运算,包括腐蚀、膨胀、开和闭^[22]。

腐蚀操作如图2所示,设 A 是原始图像, B 是结构元素,则腐蚀运算操作为

$$E(A) = A \ominus B = \{(x,y) \mid B_{xy} \subseteq A\} \quad (6)$$

由 B 对 A 腐蚀所产生的二值图像 $E(A)$ 是 (x,y) 点的集合,如果 B 的原点位移到 (x,y) 点,那么 B

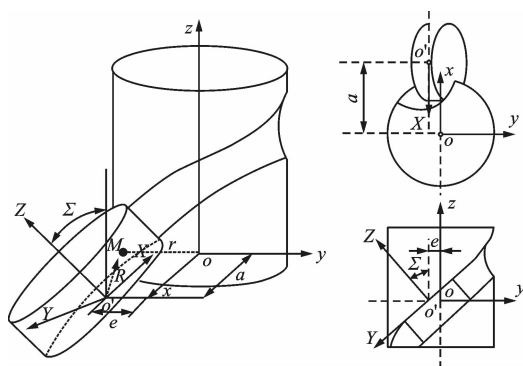


图1 砂轮安装位置图

根据图1所示的安装位置关系和坐标变换原理,容易得出被磨刀具坐标系 $[o;x,y,z]$ 与砂轮坐标系 $[o';X,Y,Z]$ 的变换关系变换矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos\Sigma & \sin\Sigma & -e \\ 0 & -\sin\Sigma & \cos\Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

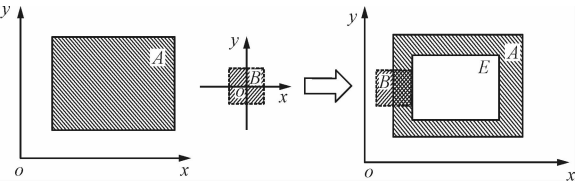


图 2 腐蚀操作示意图

将完全包含于 A 中。如果当 B 的原点移到 (x,y) 点时, B 能够完全包含于 A 中, 则所有这样的 (x,y) 点构成的集合即为 B 对 A 的腐蚀图像。

相对应, 膨胀操作如图 3 所示, 运算操作为

$$D(A) = A \oplus B = \{(x,y) \mid B_{xy} \cap A \neq \emptyset\} \tag{7}$$

B 对 A 膨胀产生的二值图像 $D(A)$ 是由点 (x,y) 组合的集合, 如图 B 的原点位移到 (x,y) , 那么它与 A 的交集非空。

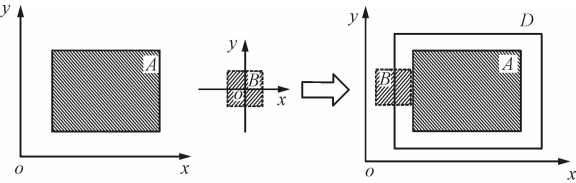


图 3 膨胀操作示意图

从二值图像中提取边界的思路: 首先对图像 A 进行腐蚀, 之后再使用 A 减去腐蚀后的结果即是提取到的边界 $\beta(A)$, 运算操作如图 4 所示。

$$\beta(A) = A - A \ominus B \tag{8}$$

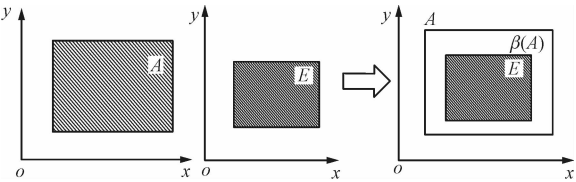


图 4 二值图像边界提取操作示意图

3 像素矩阵法

像素矩阵法借用计算机图像处理的原理, 将大量点云数据转成像素后快速获得点云边界的一种思路。由于所转成二值图像的像素点与生成的点云密度相关, 当超过计算机屏幕分辨率, 则过程中的二值图像可能无法显示, 但并不影响本算法提取容屑槽边界的运算。因为算法与具体的显示设备无关, 运算完成后还原到实际比例的廓形图像可以达到要求的精度。最后对所提取获得的包络图像边界数据处理并优化, 流程图如图 5 所示。

在模拟砂轮开槽加工过程的基础上, 结合计算

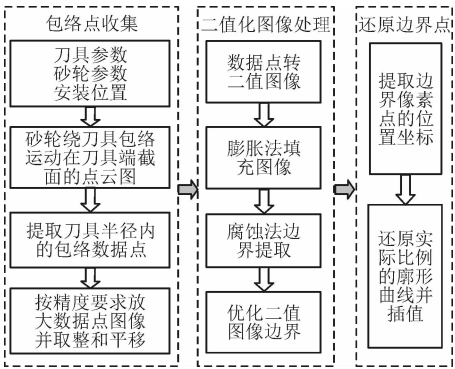


图 5 图像扫描法获取廓形流程图

机图形学相关理论, 通过定义砂轮及其走刀路径, 将砂轮面离散为点云在被磨刀具上形成包络曲线簇, 截取端截面上的点并转化成二值图像。提取的边界转换像素坐标后即为图像边缘数据, 最终可获得刀具槽形截面轮廓的精确离散数据点。具体的实施步骤如下。

步骤 1: 确定被磨刀具的结构几何参数, 磨削加工用砂轮的结构几何参数和加工安装参数。

(1) 确定被磨刀具的结构几何参数, 包括刀具的直径 r 、芯径 r_w 、前角 γ 、螺旋角 β 等相关参数。

(2) 确定磨削加工用砂轮的结构几何参数, 包括砂轮直径 R 、砂轮厚度 b 等参数。

(3) 对被磨刀具与砂轮进行空间坐标转换, 并按照相应的安装参数调整, 主要包括中心距 a 、偏心距 e 和安装角 Σ 。

步骤 2: 砂轮绕刀具包络运动在刀具端截面的点云图。砂轮回转面点云在被磨刀具坐标系下绕 z 轴做等导程螺旋运动完成包络, 在刀具容屑槽的端面 ($z=0$) 留下所有的包络点, 如图 6 所示。从图中可以看出, 有部分点云落入刀具外圆范围内, 这部分点云即为刀具端截面上容屑槽点云。

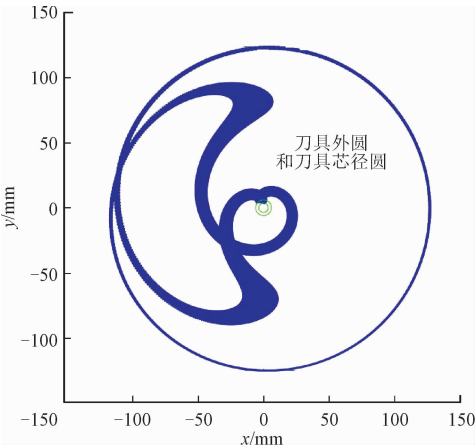


图 6 砂轮包络容屑槽端截面点云图

步骤 3: 提取刀具外圆内所包络数据点云, 即刀具端截面上容屑槽点云。针对上步骤完成包络后在端截面上留下的点云, 实现仅保留被磨刀具端截面上容屑槽点云的方法是设定边界条件为刀具直径, 查找获得端截形曲线簇的点云留在刀具外圆范围内 ($r_0 \leq r$) 所有点云, 提取包络曲线簇在刀具端面截面的点云矩阵为式 (9), 得到的点云图像为图 7 所示。点云矩阵公式为

$$\begin{bmatrix} x_1^n, y_1^n \\ x_2^n, y_2^n \\ \vdots \\ x_n^n, y_n^n \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{查找}(r_0 \leq r)} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_d & y_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $r_0 = \sqrt{(x_i^n)^2 + (y_i^n)^2}, i=1, 2, \dots, n$ 。

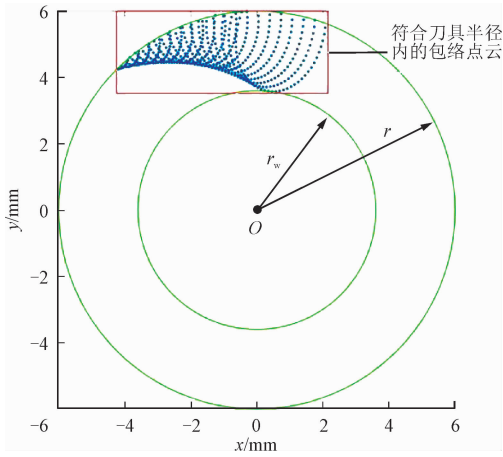


图 7 符合刀具半径内的包络点云图

在后续处理过程中主要针对符合刀具半径内的包络点云进行操作, 所以单独提取该部分点云如图 8 所示。

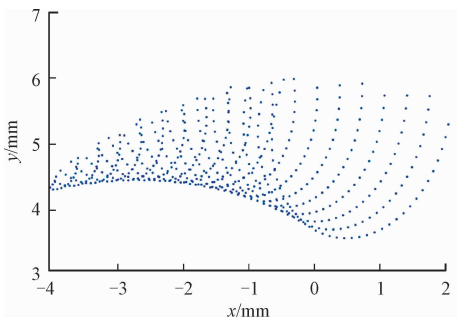


图 8 刀具半径内容屑槽端面实际点云图

步骤 4: 按精度要求放大数据点图像并取整和平移。为了能进行二值化处理, 须根据精度要求将点云进行放大、取整和平移处理, 将放大后点云的 x, y 坐标最小值置于坐标零点, 变换后图像如图 9 所示, 云变换公式为

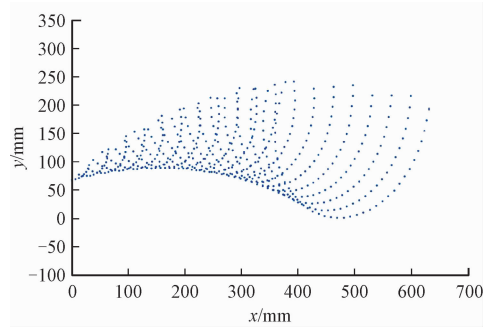


图 9 点云放大取整平移后的图像

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_d & y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{int}(Nx_1) & \text{int}(Ny_1) \\ \text{int}(Nx_2) & \text{int}(Ny_2) \\ \vdots & \vdots \\ \text{int}(Nx_d) & \text{int}(Ny_d) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_{\min} & -y_{\min} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: 放大倍数 N 与计算精度要求相关; $x_{\min} = \min(\text{int}(Nx_i))$; $y_{\min} = \min(\text{int}(Ny_i))$; $i=1, 2, \dots, n$ 。为了对点云进行放大操作具备一定精度, 建议设定适合的点密度, 过小会造成轮廓点数据过少, 造成插值的误差, 影响提取精度; 点密度数量设置过大, 会影响计算效率。

步骤 5: 数据点转二值图像。取出 x_i 的最大值 ($x_{d\max}$) 和最小值 ($x_{d\min}$) 与 y_i 的最大值 ($y_{d\max}$) 和最小值 ($y_{d\min}$) 构建行 $\times$ 列数为 $(y_{d\max} - y_{d\min}) \times (x_{d\max} - x_{d\min})$ 的矩阵, 按照下式

$$\begin{matrix} & x_{d\min} & & & & & & & x_{d\max} \\ y_{d\min} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_{d\max} & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

的形式置 (y_i, x_i) 位置的矩阵元素值为“1”, 其余矩阵位置元素值为“0”, 建立容屑槽点云的二值矩阵, 即将点云坐标进行像素的二值化处理, 然后按二值化矩阵可生成二值化图像, 如图 10 所示。

步骤 6: 进行膨胀和腐蚀处理, 提取获得刀具容屑槽的廓形曲线。膨胀和腐蚀法运算是数学形态学的基本运算, 通过式 (8) 的便可获取二值图像的边界。由于容屑槽点云数据的二值图像并非贯通区域, 为防止误提取到点云的内部边界, 所以先运用数

学形态学中膨胀算法对图像进行填充,操作结果图如图 11 所示。对填充后的图像运用数学形态学中的腐蚀和边界提取算法,即可获取容屑槽点云边界,运算后的图像如图 12 所示。

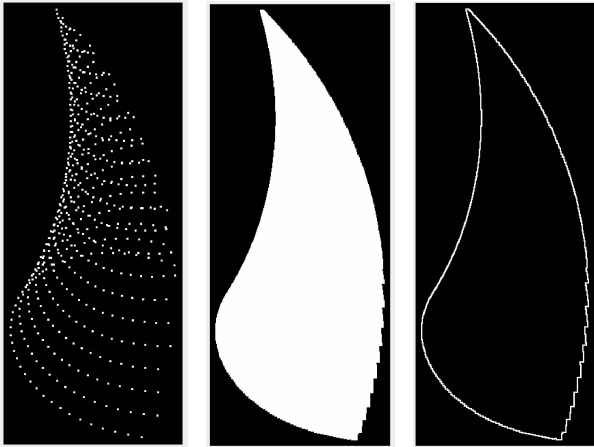


图 10 点云转换的二值图像 图 11 膨胀操作后图像 图 12 腐蚀操作后提取边界图

步骤 7:对二值图像廓形进行优化处理。由于膨胀法填充过程中增加和填补了实际不存在的像素,这些像素点中有一些与实际廓形曲线的点存在着偏差。如图 13 所示,出现阶梯型的轮廓像素边界,这里采用斜率法进行优化,将减小由于膨胀法所填充产生的像素点偏差。

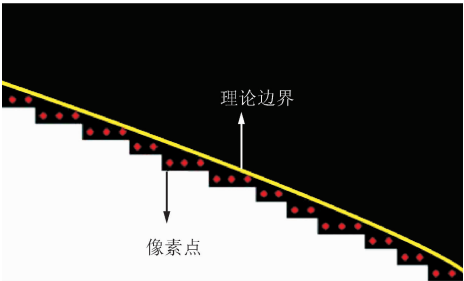


图 13 实际像素点情况示意图

根据廓形曲率的变化情况,一个像素单元中(一排像素点组成)起始像素点(坐标值 Y 最小的像素点)更加逼近理论边界的轮廓点。由此排除阶梯型像素点,可得曲线更逼近理论轮廓边界点,如图 14

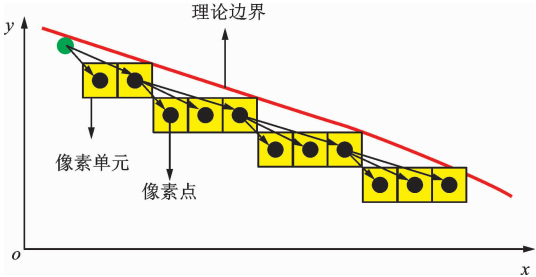


图 14 轮廓边界像素点分布规律

所示。

设定第 1 个像素单元起始像素点为起始点,给定起始点坐标为 $P_{11}(x_{11}, y_{11})$;第 n 个像素单元的起始像素点坐标为 $P_{ni}(x_{ni}, y_{ni})$,其中 $n=1, 2, \dots$; i 为像素点 $i=1, 2, \dots$; $i=1$ 时为第 n 个像素单元的像素起始点。则像素点 P_{11} 和第 n 个像素单元中任意像素点的斜率可以定义为

$$k_{ni} = \arctan\left(\frac{y_{ni} - y_{11}}{x_{ni} - x_{11}}\right) \tag{12}$$

取每个像素单元中的斜率最小位置

$$\min k_{ni} = [k_{21}, k_{31}, \dots, k_{n1}] \tag{13}$$

则斜率最小位置对应的像素点即为每个像素单元中的像素起始点。

$$[P_{21}, P_{31}, \dots, P_{n1}] = P_{\text{loca}}(\min k_{ni}) \tag{14}$$

由此,提取相同纵轴像素点仅保留斜率最小的位置像素点,反之对于像素点曲率发生反向后,可保留斜率最大的位置像素点,这种方式优化边界结果使提取的像素点更接近真实轮廓。

步骤 8:提取边界像素点的位置坐标,即获取实际比例尺寸的容屑槽廓形点数据。提取优化后二值图像廓形的像素点还原为点的坐标形式,即可得到放大比例的容屑槽廓形点,如图 15 所示。除以放大倍数 N 后,可得到还原为实际比例尺寸的容屑槽廓形点,如图 16 所示。

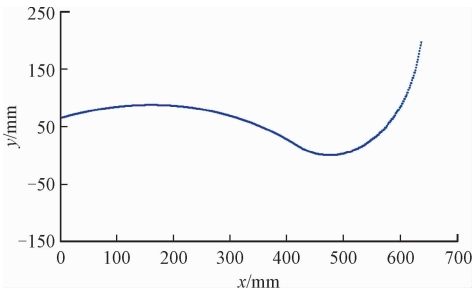


图 15 还原到放大比例的容屑槽廓形点

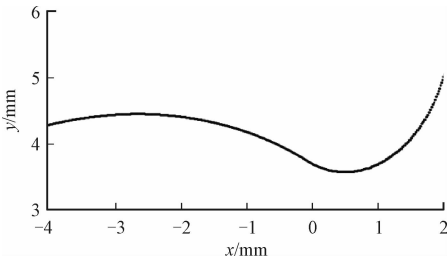


图 16 还原为实际尺寸的容屑槽廓形点

步骤 9:对上步骤完成后的离散数据点通过插值算法即可得到高精度容屑槽廓形曲线,即构造得到实际尺寸的容屑槽截形轮廓曲线,如图 17 所示。

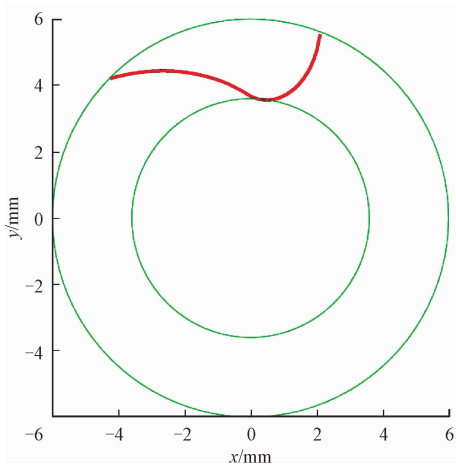


图 17 插值后实际比例刀具容屑槽廓形

4 数字实验与讨论

本方法实例选用的刀具参数、砂轮参数、安装参数和像素矩阵参数情况如表 1 至表 4 所示。

表 1 刀具参数表

参数	数值
刀具外径 r/mm	6
芯径 r_w/mm	3.6
前角 $\gamma/(\circ)$	12
螺旋角 $\beta/(\circ)$	30

表 2 砂轮参数表

类型及参数	型号及数值
砂轮类型	1A1
砂轮半径 R/mm	125
砂轮厚度 b/mm	6

表 3 安装参数表

参数	数值
中心距 a/mm	63.738 29
偏心距 e/mm	9.884 21
砂轮摆角 $\Sigma/(\circ)$	32

表 4 像素矩阵参数表

参数	数值
放大倍数 N	1 000
点密度	$21 \times 1\,001$
刀具半径内点数	533

在上述参数条件下,使用解析法(接触线法)和像素矩阵法对刀具容屑槽的端截形分别进行计算,两种方式所得到的端截形对比如图 18 所示。

本实例按照上述像素矩阵法的详细步骤执行完

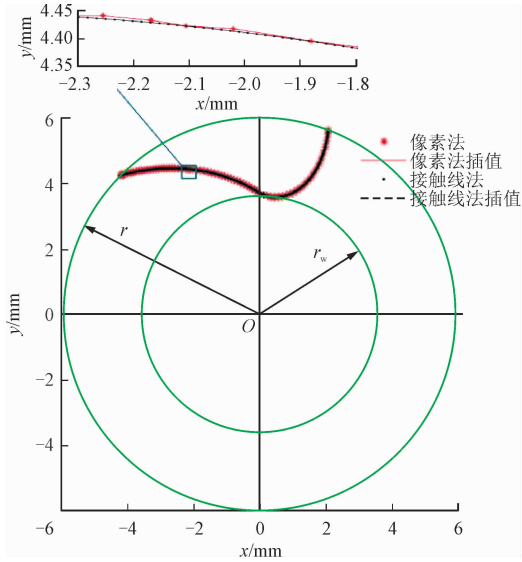


图 18 解析法与像素矩阵法廓形对比

毕之后,采集到刀具容屑槽端面廓形的数据点数 72 个,图 18 中接触线法取计算点 424 个,像素矩阵法与解析法两种方法计算得到的容屑槽廓形的误差评价方法是按照接触线法廓形点的法线方向测量像素矩阵法廓形点的相对距离作为两者的比较误差,结果如图 19 所示,像素矩阵方法与解析包络法的计算结果基本一致,两者计算的相对廓形误差基本在 $(-0.003\text{ mm}, 0.003\text{ mm})$ 范围内,因此,像素矩阵法已完全能够满足设计或加工的精度要求。

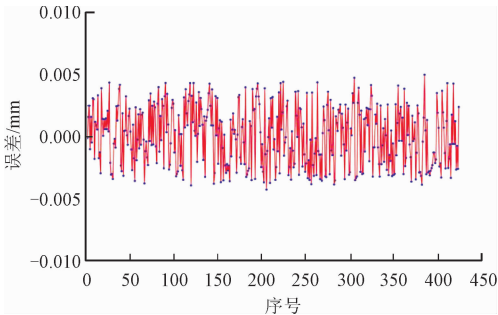


图 19 两种方法计算得到的比较误差

5 结 语

本文方法是一种新型的数字化图形解法,无需推导复杂的啮合方程式,仅需通过砂轮面离散成点后绕被磨刀具 z 轴做螺旋包络运动,然后借用二值图像的思想和方法提取容屑槽端截形的边界廓形曲线,该方法运算快、数值计算稳定,计算精度高,可直接用于开发 CAD/CAM 的电脑软件实现自动产生刀具截形,以便在正式进行刀具开槽加工前,通过仿真计算就能得到容屑槽的端截形廓形,能提前预测

加工刀具的重要参数和检验刀具结构的正确性。因此,用像素矩阵法获取整体式立铣刀容屑槽端截形的方法是模拟计算的有力工具。

参考文献:

- [1] 李国超,孙杰. 整体式立铣刀刃磨仿真技术研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(9): 165-175.
- LI Guochao, SUN Jie. Current research and development trends of end mill grinding simulation technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(9): 165-175.
- [2] LI Guochao, ZHOU Honggen, JING Xuwen, et al. An intelligent wheel position searching algorithm for cutting tool grooves with diverse machining precision requirements [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 122: 149-160.
- [3] REN L, WANG Shilong, YI Lili, et al. An accurate method for five-axis flute grinding in cylindrical end-mills using standard 1V1/1A1 grinding wheels [J]. Precision Engineering, 2016, 43: 387-394.
- [4] SHI Z D, MALKIN S. Valid machine tool setup for helical groove machining [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2004, 6(2): 148-154.
- [5] LI Guochao, ZHOU Honggen, JING Xuwen, et al. Modeling of integral cutting tool grooves using envelope theory and numerical methods [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1/2/3/4): 579-591.
- [6] KANG S K, EHMANN K F, LIN C. A CAD approach to helical groove machining: I Mathematical model and model solution [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(1): 141-153.
- [7] KANG S K, EHMANN K F, LIN C. A CAD approach to helical groove machining: part 2 Numerical evaluation and sensitivity analysis [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(1): 101-117.
- [8] 柳克辛 B C. 刀具设计的螺旋面理论 [M]. 彭祥增, 译. 北京: 机械工业出版社, 1984: 1-40.
- [9] RABABAH M M, CHEN Z Z C, WANG L M. A new approach to five-axis CNC flute grinding of solid end-mills [J]. Materials Science Forum, 2012, 723: 421-432.
- [10] TANDON P, RAJIK KHAN M. Three dimensional modeling and finite element simulation of a generic end mill [J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(2): 106-114.
- [11] PHAM T T, KO S L. A practical approach for simulation and manufacturing of a ball-end mill using a 5-axis CNC grinding machine [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1): 159-163.
- [12] RABABAH M. A practical and optimal approach to CNC programming for five-axis grinding of the end-mill flutes [D]. Montreal, Canada: Concordia University, 2011: 42-80.
- [13] KIM J H, PARK J W, KO T J. End mill design and machining via cutting simulation [J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(3): 324-333.
- [14] LI Guochao, SUN Jie, LI Jianfeng. Process modeling of end mill groove machining based on Boolean method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5/6/7/8): 959-966.
- [15] TOST D, PUIG A, PÉREZ-VIDAL L. Boolean operations for 3D simulation of CNC machining of drilling tools [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(4): 315-323.
- [16] KALDOR S, RAFAEL A M, MESSINGER D. On the CAD of profiles for cutters and helical flutes-geometrical aspects [J]. CIRP Annals, 1988, 37(1): 53-56.
- [17] 李国超. 整体式立铣刀参数化设计与周齿刃磨成形过程建模 [D]. 济南: 山东大学, 2015: 33-47.
- [18] WU Y R, FONG Z H, ZHANG Z X. Simulation of a cylindrical form grinding process by the radial-ray shooting (RRS) method [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(2): 261-272.
- [19] SHEN Zhihuang, YAO Bin, TENG Weibin, et al. Generating grinding profile between screw rotor and forming tool by digital graphic scanning (DGS) method [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(1): 35-41.
- [20] JOS R. Mathematical morphology in image processing [M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2018: 1-41.
- [21] POPOV A T. Approximate connectivity and mathematical morphology [J]. Mathematical Morphology and Its Applications to Image and Signal Processing, 2006, 18: 149-158.
- [22] 崔屹. 图象处理与分析: 数学形态学方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 15-40.

(编辑 杜秀杰)