

DOI: 10.7652/xjtuxb201702019

拉刀螺旋前刀面刃磨砂轮安装姿态计算方法

贾康, 洪军, 万少可, 荆冲

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了精确地对拉刀螺旋前刀面进行刃磨并保证良好的加工质量,提出了一种砂轮安装位置及姿态的计算方法。该算法通过空间包络原理计算砂轮磨削接触线,并给出接触线分布位置约束,以两个接触点进行前角定义,从而将满足磨削工艺要求的砂轮安装位置和姿态求解转换为一个非线性方程。然后,根据前刀面螺旋角分布规律指出,砂轮的安裝摆角应远离前刀面对应的螺旋角范围,从而将该非线性方程转换为两个单变量的搜索问题,通过牛顿-拉夫逊等方法实现快速求解。研究表明,较大的砂轮尺寸或砂轮安装摆角对应较大的砂轮安装倾角,因此建议采用贴近前刀面螺旋角的砂轮安装摆角以回避刃磨中砂轮与前一切削齿之间的干涉。基于 VERICUT 的仿真结果证明,该方法计算出的砂轮安装位置与姿态能够保证螺旋前刀面得到准确磨削。

关键词: 螺旋拉刀;刃磨;砂轮安装姿态;磨削接触线;前角

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0121-07

Wheel Orientation Calculation for Helical Rake Flank Sharpening of Broaching Tool

JIA Kang, HONG Jun, WAN Shaoke, JING Chong

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To achieve accuracy of rake angle and ensure the grinding quality of the rake flanks of broaching tools, a novel wheel orientation and position calculating method is proposed, the contact curve is identified following the enveloping theory, and its distribution constraints are obtained. Defining the rake angle by two contact points, the wheel orientation evaluation is transformed into a nonlinear equation, which is further resolved as two single-variable searching problems obeying the principle that the swing angle of the grinding wheel ought to depart away the helix angle. Thus this equation can be easily solved by Newton-Raphson method. The results indicate that either larger radius or larger swing angle of the wheel corresponds with a larger tilt angle, and a swing angle close to the helix angle of rake flank is suggested to avoid the interference between the grinding wheel and front cutting teeth. A VERCUT based simulation verifies that the wheel orientation and position from this proposed method can ensure grinding precision of the helical rake flank of broaching tool.

Keywords: helical broaching tool; rake flank sharpening; wheel orientation; contact curve; rake angle

螺旋容屑槽是圆拉刀的一个重要结构,相对于传统环型容屑槽,能够保证拉削过程中切削齿相对

与工件的渐进切入及切出,从而减小拉削力的波动,同时它还有利于切屑的卷曲和排除,改善拉刀工作性能。为延长拉刀的使用寿命并保证拉刀的切削性能,需要对拉刀的螺旋前刀面进行定期修磨。磨削过程中合理的砂轮安装位置和姿态直接决定了最终拉刀螺旋前刀面的光洁度和前角,这对于提高拉刀的切削性能至关重要。

当前螺旋拉刀前刀面的刃磨主要采用两种方法,锥面磨削和圆周磨削^[1]。其中,锥面磨削方法将螺旋前刀面看作一个直纹面,按照近似线接触状态进行砂轮安装姿态的直接计算^[2],但会导致前刀面截面廓形为凸状。圆周磨削方法令砂轮外端表面与螺旋前刀面接触形成凹状的截面廓形^[3]。相比较而言,圆周磨削方法在前刀面各点的磨削速度较为一致,有利于表面质量的提升。同时,不同于圆锥磨削砂轮的尺寸受制于螺旋面的曲率约束,圆周磨削可以采用大尺寸的砂轮提升磨削加工效率,因此螺旋前刀面的磨削多采用圆周磨削方法。

当前的砂轮安装姿态多直接设定砂轮偏移螺旋沟槽螺旋角为 $1^\circ \sim 2^\circ$,以控制前刀面廓形的内凹度,并未对砂轮磨削接触线的实际作用形态进行深入分析。Arthur Klink 万能数控拉刀刃磨机床随机配备的计算机辅助制造(CAM)系统能够自动进行螺旋前刀面磨削的砂轮安装位姿计算,但是系统和算法不开放。因此,为彻底解决拉刀螺旋前刀面的刃磨砂轮位姿计算,需要从螺旋槽加工成型的方法进行探索。

在砂轮结构简单的情形下,螺旋槽的廓形可以基于空间包络原理和微分几何等解析方法^[4-7]通过计算磨削接触线来确定。当砂轮结构复杂,其磨削接触线存在奇异点时,需要对奇异点进行曲线插入处理^[8],或者对磨削接触线进行逐段分析^[9],计算的通用性较差。另一方面,为了回避接触线存在奇异点的情形,也可以从离散角度对螺旋容屑槽的结构截面廓形进行计算^[4-5,10-13]。即首先将砂轮沿轴向离散成一系列薄片,然后求解砂轮空间运动扫掠体与拉刀轴向截面的交点,最终这些交点的包络即为加工出的螺旋容屑槽的廓形。

在准确计算螺旋容屑槽截面廓形的基础上,求解合适的砂轮安装姿态以满足设计目标参数就可以看作一个搜索问题。不论是直接面向容屑槽廓形匹配的粒子群搜索算法^[14],还是基于容屑槽前角和前刀面法向信息的初始姿态设置^[15],亦或是将砂轮安装姿态设置看作一个非线性方程求解问题^[16],都可

以通过数值求解来完成。尽管这些方法都能够满足精确螺旋容屑槽结构的加工,但是都没有磨削接触线的作用位置进行约束。在实际磨削过程中,合理的接触线作用位置能够保证加工表面获得较高的光洁度并去除切削刃的毛刺等。与此同时,考虑到拉刀刃磨的经济性,实际生产中通常采用具有通用性圆弧倒角立方氮化硼(CBN)薄片砂轮,这潜在地排除了磨削接触线存在奇异点的可能性。

因此,本文在采用解析法求解砂轮的磨削接触线的基础上,针对拉刀螺旋前刀面的实际磨削加工工艺施加磨削接触线作用位置的约束,进而通过数值算法求解出满足螺旋前刀面磨削要求的砂轮安装姿态,这对于拉刀螺旋前刀面的刃磨 CAM 系统开发有重要指导意义。

1 砂轮安装定位模型

1.1 砂轮廓型定义

考虑到拉刀螺旋容屑槽制造和修磨的要求及其经济性,通常采用常规的圆弧倒角 CBN 砂轮,这样能够避免砂轮特殊廓型的加工,大大降低了操作难度,并且有利于每一把拉刀刃磨用砂轮的统一管理。

常规的圆弧倒角 CBN 砂轮结构如图 1 所示,定义砂轮坐标系 $O_g-X_gY_gZ_g$ 如下:原点 O_g 与砂轮中心面和砂轮回转轴的交点重合, Z_g 轴与砂轮的回转轴重合, X_g 轴和 Y_g 轴相互垂直。

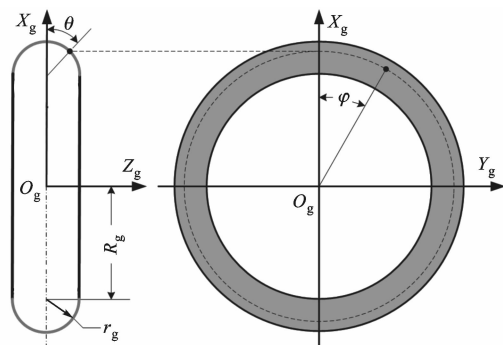


图1 砂轮形状定义

砂轮的有效磨削部分是其外端的圆弧曲面,即一个大径为 R_g 小径为 r_g 的局部圆环面,其参数方程如下

$$S_g(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} (r_g \cos \theta + R_g) \cos \varphi \\ (r_g \cos \theta + R_g) \sin \varphi \\ r_g \sin \theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$; $\varphi \in [0, 2\pi)$ 。

相应的,砂轮工作表面上每一点的法线参数方

程如下

$$\mathbf{N}_s(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi \\ \cos\theta\sin\varphi \\ \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 砂轮安装姿态定义

要实现螺旋前刀面的正确刃磨,砂轮必须与拉刀之间形成一定的位置关系。因此,首先定义拉刀坐标系 $O_b-X_bY_bZ_b$ 如图 2a 所示:原点 O_b 在刀具回转轴上, Z_b 轴与刀具回转轴重合, X_b 轴指向刀具正上方, Y_b 轴由右手准则确定。

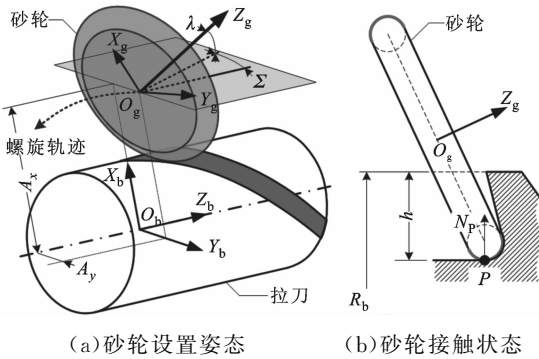


图 2 砂轮安装姿态定义

在实际加工中,考虑到机床的结构和支撑工装结构,一般将砂轮置于拉刀的上方,便于对刀操作。此时,砂轮原点 O_g 距离 Z_b 轴在 X_b 和 Y_b 轴的分量分别为 A_x 和 A_y 。同时,规定砂轮按照如下方式进行安装姿态的设定:首先绕 X_g 轴旋转角度 Σ ,然后绕更新后的 Y_g 轴旋转角度 λ 。因此,砂轮坐标系向刀具坐标系的转换矩阵如下

$$\mathbf{M}_b^g = \begin{bmatrix} \cos\lambda & 0 & \sin\lambda & A_x \\ \sin\lambda\sin\Sigma & \cos\Sigma & -\sin\Sigma\cos\lambda & A_y \\ -\cos\Sigma\sin\lambda & \sin\Sigma & \cos\Sigma\cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在磨削过程中,砂轮相对于拉刀做与螺旋容屑槽一致的螺旋进给运动,即拉刀绕自身轴线做回转运动的同时,砂轮沿着拉刀回转轴线进行同步线性运动。因此,砂轮在刀具坐标系中的位置是关于时间 t 的转换矩阵 $\mathbf{M}(t)$,公式如下

$$\mathbf{M}(t) = \begin{bmatrix} \cos t & -\sin t & 0 & 0 \\ \sin t & \cos t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \pm tL_b/(2\pi) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: + 代表右旋; - 代表左旋; L_b 为螺旋容屑槽的

导程。

砂轮表面一点在刀具坐标系中的坐标 $\mathbf{S}_g^b(\theta, \varphi, t)$ 和法向量 $\mathbf{N}_g^b(\theta, \varphi, t)$ 可以确定如下

$$\mathbf{S}_g^b(\theta, \varphi, t) = \mathbf{M}(t)\mathbf{M}_b^g\mathbf{S}_g(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} x_s(\theta, \varphi, t) \\ y_s(\theta, \varphi, t) \\ z_s(\theta, \varphi, t) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{N}_g^b(\theta, \varphi, t) = \mathbf{M}(t)\mathbf{M}_b^g\mathbf{N}_g(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} x_n(\theta, \varphi, t) \\ y_n(\theta, \varphi, t) \\ z_n(\theta, \varphi, t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 螺旋前刀面磨削原理及工艺分析

对于拉刀螺旋前刀面的磨削加工,除了要求加工出精确的前角,还需要保证切削刃的锋利和前刀面的光洁度。在前刀面的磨削过程中,砂轮相对于拉刀做空间螺旋运动,砂轮与拉刀前刀面之间呈线接触,接触线在空间扫掠出螺旋前刀面。一方面,必须对砂轮姿态进行合理地设置才能够保证获得精确前角;另一方面,只有当磨削接触线恰当地作用在前刀面上时才能保证拉刀切削刃的锋利和前刀面较好的加工质量。因此,要求对砂轮安装姿态进行合理地设定。

2.1 螺旋前刀面前角定义与计算

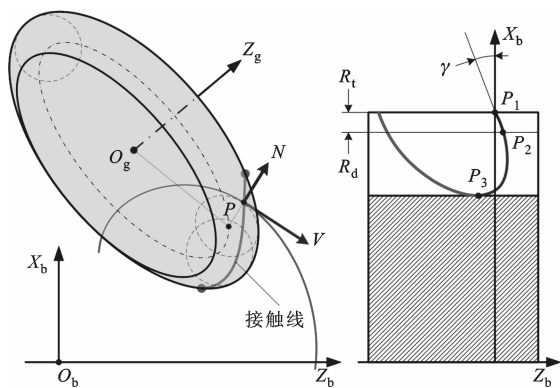
如图 3 所示,拉刀螺旋前刀面的前角在拉刀的轴向剖面内定义。由于砂轮磨削接触线为一空间曲线,作用在拉刀轴向剖面内为曲线 P_1P_3 ,定义半径 R_t 对应的 P_1 点与半径 R_d 对应的 P_2 点之间的连线与 X 轴的夹角为前角 γ ,且其正负性与 P_1P_2 的 Z 轴分量一致, γ 的表达式为

$$\gamma = \arccos \frac{P_1P_2[1, 0, 0]^T}{|P_1P_2|} \quad (7)$$

由空间包络原理可知,砂轮表面上运动速度矢量 $\mathbf{V}$ 与法向量 $\mathbf{N}$ 垂直的点构成砂轮运动的包络线。包络线的空间运动轨迹即形成砂轮的空间包络面。由于拉刀螺旋前刀面是由砂轮空间包络面加工形成的,即由砂轮的包络线扫掠而成,因此该包络线就是砂轮的磨削接触线,其上任意一点 P 满足下式

$$\mathbf{V}_g^b(\theta, \varphi, t)\mathbf{N}_g^b(\theta, \varphi, t) = 0 \quad (8)$$

式中: P 点的法向矢量 $\mathbf{N}_g^b$ 由式(6)确定; P 点的速度矢量 $\mathbf{V}_g^b$ 由下式确定



(a) 砂轮接触线分布 (b) 螺旋前刀面前角定义

图 3 螺旋前刀面前角定义和砂轮接触线计算原理

$$\mathbf{V}_g^b(\theta, \varphi, t) = \frac{\partial \mathbf{M}(t)}{\partial t} \mathbf{M}_g^s \mathbf{S}_g(\theta, \varphi) \quad (9)$$

因此,在给定砂轮安装位置和姿态下,可以结合式(8)和半径约束 \$R\$ 建立非线性方程组 \$f(\theta, \varphi, t)\$

$$\left. \begin{aligned} f(\theta, \varphi, t) |_{t=0} = \\ V_P(\theta, \varphi, t) N_P(\theta, \varphi, t) = 0 \\ (x_P(\theta, \varphi, t)^2 + y_P(\theta, \varphi, t)^2)^{1/2} = R \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

计算出前角 \$\gamma\$ 定义的接触线作用点 \$P\$ 的位置 \$[x_P, y_P, z_P]^T\$。然后,将 \$P\$ 点转换到刀具的 \$X_b-O_b-Z_b\$ 剖面内,即可计算出当前砂轮安装位置和姿态下定义前角 \$\gamma\$ 的 \$P_i\$ 点的坐标如下

$$\mathbf{M}(t_i) [x_P, y_P, z_P]^T \quad (11)$$

式中: \$i=1, 2; t=\pm \arctan(y_P/x_P)\$, \$+\$ 用于右旋前刀面, \$-\$ 用于左旋前刀面。

2.2 磨削接触线分布位置分析

在磨削过程中,砂轮高速自转形成主切削运动,同时砂轮相对于拉刀的螺旋进给运动扫掠出前刀面。在任一瞬间,砂轮对螺旋前刀面的切削作用在砂轮的磨削接触线上。为了保证拉刀切削齿的齿顶切削刃无毛刺,要求砂轮的切削速度沿着磨削接触线从拉刀切削齿顶刃指向沟底。同时,为了保证前刀面具有较好的光洁度,要求砂轮与螺旋前刀面仅单侧接触,即进行前刀面磨削的砂轮磨削接触线分布于砂轮 \$X_g-O_g-Z_g\$ 的一侧。

以右旋螺旋前刀面为例,如图 4a 所示,当砂轮采用图中顺时针方向旋转时,磨削接触线 \$MN\$ 段应完全位于 \$Y_b\$ 轴的正区间,这样才能够保证砂轮的磨削速度从拉刀切削齿的齿顶指向齿根,并且砂轮另一侧与已磨削完成的前刀面不接触,从而不会影响前刀面的磨削质量。同样的,当砂轮采用图中逆时针方向旋转时,磨削接触线 \$MN\$ 段应如图 4b 所示完全位于 \$Y_b\$ 轴负区间。

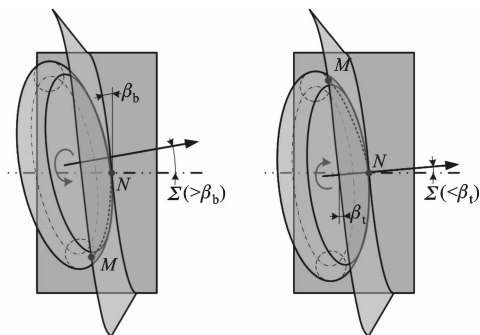
(a) 砂轮顺时针旋转 (b) 砂轮逆时针旋转
磨削接触线分布 磨削接触线分布

图 4 砂轮安装姿态设置

在实际加工中,砂轮的安装姿态角 \$\Sigma\$ 对于砂轮磨削接触线的分布有决定性作用。由于螺旋前刀面的导程 \$L_b\$ 固定,所以拉刀切削刃齿顶对应的螺旋角 \$\beta_l\$ 小于齿根对应的螺旋角 \$\beta_b\$。因此,要实现图 4a 中砂轮接触线 \$MN\$ 分布在 \$Y_b\$ 正区间,砂轮的安装角 \$\Sigma\$ 应该设置的较大一些,这样能够保证砂轮在 \$Y_b\$ 正区间贴合螺旋前刀面,而在 \$Y_b\$ 负区间分离。相应的,对于图 4b 中砂轮安装的情形,其安装角 \$\Sigma\$ 应该设置的较小一些,以保证砂轮在 \$Y_b\$ 正区间脱离螺旋前刀面,而在 \$Y_b\$ 负区间与螺旋前刀面贴合。在求解计算时可以根据砂轮的旋转方向将 \$\Sigma\$ 的初值设置为螺旋角 \$\beta_l\$ 或 \$\beta_b\$。尽管该条件并不保证砂轮接触线单侧分布条件一定满足,但是可以作为初值有效地减少后期的调整。同时,该设置方法清晰地指明,当砂轮磨削接触线不满足单侧分布时,可以按照远离 \$[\beta_l, \beta_b]\$ 的方式对安装角 \$\Sigma\$ 进行调整。

3 砂轮安装姿态计算

根据前述分析可知,要加工出精确的前角并保证螺旋前刀面的加工质量,需要合理的砂轮安装位置和姿态,并保证砂轮磨削接触线作用在正确的位置。基于此,根据拉刀前刀面的刃磨工艺要求进行砂轮安装位置和姿态的计算。

3.1 砂轮安装位置计算

为了保证螺旋前刀面得到完整磨削并保证固定的容屑槽深度 \$h\$,则需要让砂轮贴合于容屑槽沟底和螺旋前刀面,如图 2b 所示。为了简化计算模型,令砂轮与容屑槽沟底最高点 \$[R_t - h, 0, 0]^T\$ 接触,这时砂轮在该点的表面外法向量如下

$$\mathbf{N}_g^b(\theta, \varphi, t) |_{t=0} = [1, 0, 0]^T \quad (12)$$

结合式(6),可以计算出砂轮表面对应的 \$P\$ 点 \$\theta = -\lambda, \varphi = \pi\$。将该条件代入式(5),有

$$\mathbf{S}_g^h(\theta, \varphi, t) \mid_{\theta=\lambda, \varphi=\pi, t=0} = [R_t - h, 0, 0, 1]^T \quad (13)$$

因此,可以计算出砂轮的安装位置 A_x 和 A_y 如下

$$\left. \begin{aligned} A_x &= R_t - h + R_g \cos(\lambda) + r_g \\ A_y &= \sin(\Sigma) \sin(\lambda) R_g \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

3.2 砂轮安装姿态计算

在给定砂轮的安装姿态和位置下,可以计算出加工的螺旋前刀面的前角 γ ,同时砂轮的磨削接触线作用位置也能够得到准确的解析求解。所以,可以将加工的螺旋前刀面前角 γ 看作关于砂轮安装角 Σ, λ 的函数 $G(\Sigma, \lambda)$ 。因此,合理的砂轮安装姿态可以看作下列非线性方程的解

$$G(\Sigma, \lambda, \gamma_d) = G(\Sigma, \lambda) - \gamma_d = 0 \quad (15)$$

同时,要求砂轮的磨削接触线满足单侧分布的条件约束。考虑到接触线无法隐式表达,因此采用一系列接触点 $\mathbf{C}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 进行离散表达,要求所有接触点满足

$$\pm y_i \geq 0 \quad (16)$$

式中:±对应接触线不同的分布位置需求。

该非线性方程的求解等价于一个双变量搜索问题,为了提高求解速度,根据砂轮旋转方向设定 Σ 的初值为螺旋角 β_t 或 β_b 。

为了简化计算流程,按照图 5 所示流程进行砂轮安装姿态的计算。首先根据给定的砂轮安装角 Σ 和 λ 计算砂轮的合理安装位置 A_x 和 A_y ,然后基于包络原理计算出砂轮的磨削接触线并求出当前加工的前角 γ 。如果前角不满足目标要求,则仅调整砂轮安装角 λ 即可;若前角 γ 满足目标要求,则进一步验证砂轮磨削接触线的单侧接触条件是否满足。如果以上条件都满足,则表明当前砂轮安装姿态可以加工出准确的前角并能保证前刀面的磨削质量。否则,需要对砂轮的安装角 Σ 进行调整,使之进一步地远离 $[\beta_t, \beta_b]$ 区间。如此进行循环计算,直至砂轮

安装姿态满足式(16)的停止要求。在这个计算流程中,变量 λ 和 Σ 被组织为两个独立的单变量搜索,可以通过常规搜索方法,如牛顿-拉夫逊方法完成。

4 方法验证与讨论

基于本文提出的拉刀螺旋前刀面刃磨砂轮安装位置与姿态计算方法,首先对某拉刀的刃磨完成了砂轮安装姿态的计算,并基于 CAD 模型进行了仿真实验验证,最后对砂轮的可用安装姿态的分布规律进行了分析与讨论。

4.1 实例验证

为了验证本文提出的算法,进行了磨削加工实验并利用行业内成熟的 VERICUT 加工仿真软件对磨削过程进行了虚拟仿真。

选用的砂轮参数 $R_g = 50 \text{ mm}$, $r_g = 1.25 \text{ mm}$,磨削加工对象螺旋拉刀的结构参数如表 1 所示。利用本文提出的算法计算出砂轮安装位置和姿态: $A_x = 113.922 \text{ mm}$, $A_y = 7.087 \text{ mm}$, $\Sigma = 8.5^\circ$, $\lambda = 39.740^\circ$ 。

表 1 螺旋拉刀结构参数

L_b/mm	旋向	R_t/mm	R_d/mm	h/mm	$\gamma/(^\circ)$
50.8	右旋	60	59	5	15

根据计算得到的砂轮安装位置和姿态调整机床,对拉刀进行磨削加工。最终的实验结果表明,磨削得到的拉刀前刀面具有很好的表面加工质量,加工场景如图 6 所示。由于螺旋拉刀的前刀面前角的测量比较困难且存在较大的测量误差,因此为了验证本文计算方法的准确性,利用加工仿真软件 VERICUT 进行仿真实验,如图 7a 所示。按照计算得到的砂轮安装位置和姿态来定义砂轮的安装位置,最后利用软件对仿真得到的拉刀前刀面最终轮廓的前角进行测量,为 14.98° ,满足加工要求,如图 7b 所示。由此可以证明,本文所提出的砂轮安装位置及姿态的计算方法能够有效地解决拉刀前刀面磨削过程中砂轮安装位置及姿态的确定问题。



图 6 螺旋内齿圈拉刀刃磨状态

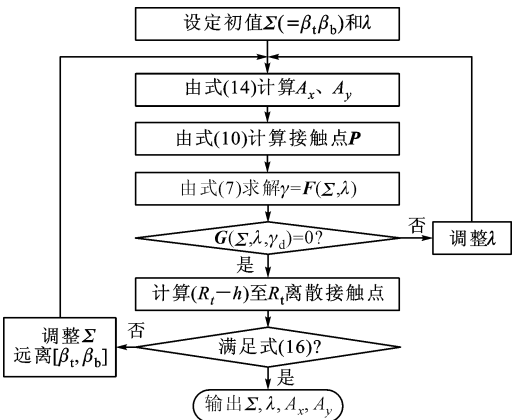
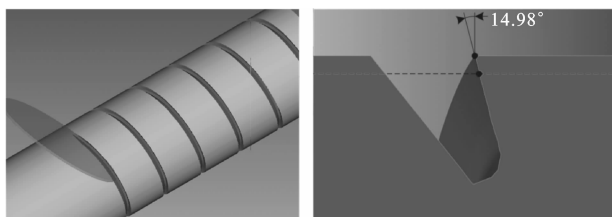


图 5 砂轮安装姿态计算流程



(a) VERICUT 仿真

(b) 仿真结果

图7 基于 VERICUT 的加工仿真验证

4.2 砂轮安装姿态讨论

在实际加工中,满足螺旋前刀面刃磨要求的砂轮安装姿态并不唯一,但是受制于具体的工艺约束等,往往需要选择不同尺寸的砂轮并调整其安装姿态。因此,有必要对砂轮安装姿态和砂轮尺寸之间的关系进行分析。

以表1中的螺旋拉刀为对象,对不同半径的砂轮分别计算其安装角 Σ 、 λ ,结果如图8所示。由图可知,对于同一砂轮,随着砂轮安装角 Σ 的增大,砂轮需要设置更大的安装角 λ 以保证前角的准确加工。同时,若给定相同的砂轮安装角 Σ ,则尺寸越大的砂轮需要越大的砂轮安装角 λ 来满足前角的加工要求。

在实际加工中,砂轮的安装姿态受制于机床主轴姿态定位轴运动范围,此外为了保证前刀面的磨削速度,砂轮尺寸需要综合考虑机床的主轴转速来选取,因此砂轮的安装姿态需要结合实际的机床规格来合理地确定。另外,当拉刀切削齿的齿距较小时,过大的砂轮安装角 λ 将导致砂轮与前一切削齿的齿背发生干涉。因此,一般建议尽可能地选用砂轮安装角 λ 较小的砂轮安装姿态。相应地,建议砂轮安装角 Σ 与螺旋前刀面的螺旋角相近。

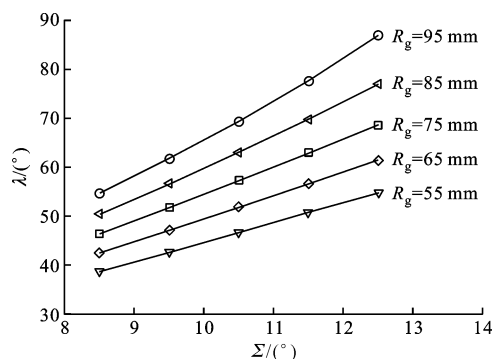


图8 砂轮安装姿态分布

由上分析可知,在拉刀磨削加工过程中,需要在保证砂轮与已加工部分无干涉并考虑机床主轴姿态定位轴运动范围以及主轴转速等前提下,选择合适的砂轮半径,并进一步地确定砂轮的安装姿态。

5 结论

本文提出了一种能够保证拉刀螺旋前刀面刃磨光洁度并获取精确前角的砂轮安装姿态计算方法。

(1)基于包络原理,将准确前角的加工问题转换为两个磨削接触点求解的问题,同时通过离散接触点的计算进行前刀面单侧磨削接触条件的判定。最后,根据螺旋前刀面的螺旋角分布规律,指出砂轮的安装角 Σ 应远离区间 $[\beta_l, \beta_b]$,从而将砂轮安装姿态的计算转换为单变量的非线性方程求解,并通过牛顿-拉夫逊方法快速求解。

(2)分析了砂轮尺寸与砂轮安装姿态之间的关系,较大尺寸的砂轮或者大的砂轮安装角 Σ 对应着较大的砂轮安装角 λ 。考虑到实际加工的工艺约束,建议采用贴近螺旋角的安装角 Σ 以回避砂轮与前一切削齿之间的干涉。同时,需要考虑机床的规格性能对砂轮尺寸进行合理的选择,并进一步确定合理的砂轮安装姿态。

参考文献:

- [1] 袁哲俊,刘华明. 金属切削刀具设计手册:拉刀[M]. 北京,机械工业出版社,2009:139-141.
- [2] 吴道泉. 铣刀周齿螺旋前刀面的刃磨[J]. 常州工业大学学报(自然科学版),2003,32(3):15-21.
WU Daoquan. How to sharpen the helix front of the mill cylindrical tooth[J]. Journal of Changzhou University of Technology (Natural Science Edition), 2003, 32(3): 15-21.
- [3] 郭非,王启义,雷为民. 螺旋刃刀具前刀面数控磨削工艺及刀位计算[J]. 中国机械工程,1999,10(1):10-11,33.
GUO Fei, WANG Qiyi, LEI Weimin. CNC grinding process analysis and path generation for the rake face of helical curve cutters[J]. Chinese Mechanical Engineering, 1999, 10(1): 10-11, 33.
- [4] EHMANN K F, DE VRIES M F. Grinding wheel profile definition for the manufacture of drill flutes[J]. CIRP Ann: Manuf Technol, 1990, 39(1): 153-156.
- [5] SHETH D S, MALKIN S. CAD/CAM for geometry and process analysis of helical groove machining[J]. CIRP Ann: Manuf Technol, 1990, 39(1): 129-132.
- [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 & Manufacture, 1996, 36(1): 141-

- 153.
- [7] ZHANG W, WANG X, HE F, et al. A practical method of modelling and simulation for drill fluting [J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2006, 46(6): 667-672.
- [8] NGUYEN V H, KO S L. Determination of workpiece profile and influence of singular point in helical grooving [J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 2013, 62: 323-326.
- [9] XIAO S, WANG L, CHEN Z C, et al. A new and accurate mathematical model for computer numerically controlled programming of 4Y1 wheels in 2 1/2-axis flute grinding of cylindrical end-mills [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2013, 135: 41008.
- [10] KALDOR S, RAFAEL A M, MESSINGER D. On the CAD of profiles for cutters and helical flutes-geometrical aspects [J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 1988, 37(1): 53-56
- [11] KO S L. Geometrical analysis of helical flute grinding and application to end mill [J]. *Transactions of NAMRI/SME*, 1994, 22: 165-172.
- [12] PUIG A, PEREZ-VIDAL L, TOST D. 3D simulation of tool machining [J]. *Computers and Graphics*, 2003, 27(1): 99-106.
- [13] LI G, SUN J, LI J. Modeling and analysis of helical groove grinding in end mill machining [J]. *J Mater Process Technol*, 2014, 214: 3067-3076.
- [14] KARPUSCHEWSKI B, JANDECKA K, MOUREK D. Automatic search for wheel position in flute grinding of cutting tools [J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 347-350.
- [15] RABABAH M M, CHEN Z C. An automated and accurate CNC programming approach to five-axis flute grinding of cylindrical end-mills using the direct method [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2013, 135(1): 228-229.
- [16] REN Lei, 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: 387-39.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 52 页)

- [6] GROBSCHADL J, HUDLER M, KOSCHUCH M, et al. Smart elliptic curve cryptography for smart dust [M]// *Quality, Reliability, Security and Robustness in Heterogeneous Networks*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012: 623-634.
- [7] LIU Zhe, GROBSCHADL J, WONG D S. Low-weight primes for lightweight elliptic curve cryptography on 8-bit AVR processors [M]// *Information Security and Cryptology*. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2013: 217-235.
- [8] LIU Zhe, WENGER E, GROBSCHADL J. Mote-ECC: energy-scalable elliptic curve cryptography for wireless sensor networks [M]// *Applied Cryptography and Network Security*. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2014: 361-379.
- [9] ZHANG Yang, GROBSCHADL J. Efficient prime-field arithmetic for elliptic curve cryptography on wireless sensor nodes [C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Science and Network Technology*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 459-466.
- [10] SEO H, LIU Zhe, NOGAMI Y, et al. Montgomery multiplication and squaring for optimal prime fields [J]. *Computers and Security*, 2015, 52: 276-291.
- [11] SEO H, KIM H. Multi-precision multiplication for public-key cryptography on embedded microprocessors [M]// *Information Security Applications*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012: 55-67.
- [12] DUSSE S R, KALISKI B S. A cryptographic library for the Motorola DSP56000 [C]// *Proceedings of the ACM*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990: 230-244.
- [13] MENEZES A J, VANSTONE S A, OORSCHOT P C V. Handbook of applied cryptography [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1996: 67-80.
- [14] COMBA P G. Exponentiation cryptosystems on the IBM PC [J]. *IBM Systems Journal*, 1990, 29(4): 526-538.
- [15] MIPS Technologies, Inc. MIPS64® architecture for programmers: Volume II The MIPS64 instruction set revision 3.0; MD00087 [EB/OL]. (2010-03-25) [2016-06-01]. <http://www.doc88.com/p-497900094247.html>.

(编辑 武红江)