

满足芯厚和前角条件的麻花钻螺旋槽几何模型和分析

李铸宇,王洪阳,刘贺轩,胡建忠

大连工业大学

摘要: 非标钻头的制造近年涌现出多种槽型。作为传统啮合开槽的替代方法,用 1V1/1A1 标准砂轮开槽逐渐得到推广,此时必须满足芯厚和前角的条件,精确搜索出数控加工时砂轮的安装位置。本文提出一种直接确定砂轮位置的新方法,基于相对运动原理实现参数化,利用微分几何的等距曲线推导满足芯厚的方程,用一维搜索满足前角条件,计算过程简单易操作。比较相同芯厚和前角槽型的比较,揭示了磨削参数和砂轮几何形状对生成槽型的影响规律。实际加工的槽型横截面数据和计算结果一致,证明方法有效,可进一步建立实用的刀具槽型图谱。

关键词: 麻花钻;螺旋槽;等距曲线;芯厚;前角

中图分类号: TG713.1;TH162

文献标志码: A

Modeling and Analysis of Twist Drill Fluting Fulfilling Required Web Thickness and Rake Angle

Li Zhuyu, Wang Hongyang, Liu Hexuan, Hu Jianzhong

Abstract: Different kinds of flute configuration and modeling are developed for drills and other non-traditional cutting tools in last decades. As substitute of the meshing theory based fluting method, a kind of flute prevails is ground by using 1V1/1A1 standard wheel, and it should fulfill required web thickness and radial rake angle and to search an accurate wheel position for CNC grinding. This paper presents a novel method by straight forwardly determining install position of the grinding wheel. Based on the relative movement with variables' parameterization, equations to keep web thickness are firstly derived. Then, a family of flute cross-sectional curves is computed automatically with respect to grinding process parameters and wheel geometry. The calculation process is characterized by concise in principle and easy to use. Its validity is verified by good agreement between the results computed and manufactured example. The proposed method is flexible and adaptable to different wheels and could play as a role of grinding parameters atlas for drill design.

Keywords: twist drill; flute; equidistant curve; web thickness; rake angle

1 引言

要适应现代制造业中涌现的性能各异的加工材料,麻花钻必须设计成独特的几何结构。螺旋槽影响主切削刃和排屑,是决定钻头切削性能的重要结构^[1]。螺旋槽的几何形状复杂,目前数控加工中广泛使用的硬质合金刀具的螺旋槽,只能用金刚石砂轮来磨削,加工困难且费时。传统的设计方法基于啮合原理,要求砂轮和槽型曲面的接触点上有公共的法矢,且相对运动速度与公法线垂直^[2],这是啮合时接触线满足的基本条件。干涉(过切)情况的出现^[3,4]使工件截形边缘被多切去一部分,或出现截面上的尖点,难以严格保证啮合条件。

近年流行的模拟加工运动的直接法^[5,6]可以避

免啮合方程的求解。它是已知砂轮的截形和安装位置,确定加工出的槽型,但在生产实际中,指定的芯厚和前角条件首先要满足,因为芯厚决定了钻头的刚度,前角则影响切削力和排屑。虽然各种三维造型^[7]和现代优化算法(遗传算法^[8]和粒子群算法^[9]等)被利用,但由于槽型同时受砂轮几何形状和加工参数的影响,变量之间复杂的非线性关系,分析中难以找到槽型变化的规律^[10],使求解变得困难,远未达到实用阶段。

本文推导了给定芯厚条件下加工参数满足的解析表达式,将多变量的问题简化,绘制了相同芯厚和前角条件下的槽型曲线族,它们既满足设计中对槽性能的基本要求,又直观地反映出单个加工参数对螺旋槽几何形状的影响。这对了解各种类型标准砂轮加工的槽型几何特点,并按已知芯厚和前角条件分类选择适用的槽型有实际应用价值。

2 数学模型

2.1 坐标系的建立

建立如图1所示全局坐标系 $\{o: x, y, z\}$ 和与砂轮一起作螺旋运动的动坐标系 $\{o_1: x_1, y_1, z_1\}$ ^[11]。其中 z 轴与 z_1 轴之间的垂直距离为中心距 A ,它们之间的夹角为安装角 β ;砂轮后端侧面到原点 o_1 的距离为偏心距 T_1 。砂轮的安装位置和方向仅由 A 、 T_1 和 β 三个参数唯一确定,称作加工参数。

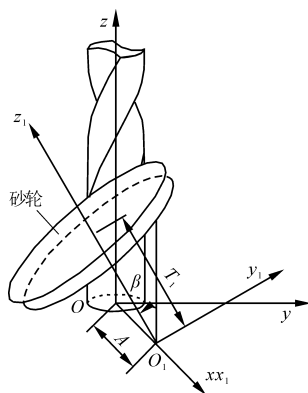


图1 坐标系

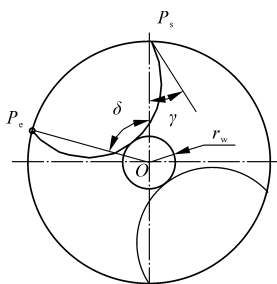


图2 芯厚半径、前角和槽宽角

如图2所示,钻头的芯厚半径 r_w 定义为螺旋槽横截面曲线的内切圆半径,径向前角 γ 为外缘转点与圆心 O 的连线和该点螺旋槽横截面曲线的切线之间的夹角,槽宽角 δ 是螺旋槽横截面曲线起点 P_s 和终点 P_e 分别与圆心 O 连线之间的夹角, r_w 、 γ 和 δ 是确定螺旋槽型状的几何参数。

如图3所示,选取加工中常用的1V1碟形砂轮(1A1直圆柱砂轮是 $\lambda = 90^\circ$ 的特例),它的几何形状由砂轮半径 r ,宽度 W ,圆角半径 ρ 和斜角 λ 决定。砂轮上最大直径处所在大圆记为 Q 。

2.2 满足给定芯厚条件

如图4所示,以 Q 的圆心 o_2 为原点,建立辅助坐标系 $\{o_2: x_2, y_2, z_2\}$ 。其中, x_2 和 x 轴重合; y_2, z_2 轴分别和 y, z 轴平行。初始时刻, o_2 位于毛坯轴线的正上方,由于直径最大的这个砂轮薄片切入毛坯

最深,它将决定加工出的螺旋槽的芯厚。当中心距设定为 $A = r + r_w$ 时,即可保证芯厚半径 r_w 。如果沿轴线将砂轮切成一张张薄片,每个薄片即是直径不同的圆。任意一个砂轮薄片在主视图 $x_2 - o_2 - y_2$ 平面中的投影是一个椭圆。整个砂轮的投影就是由这些椭圆相互叠加,形成的最外部的轮廓。

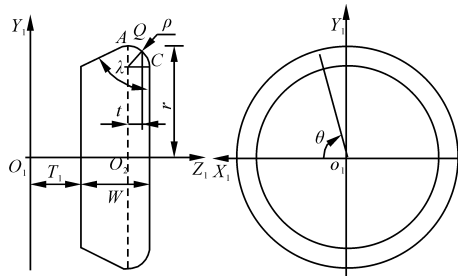


图3 1V1 砂轮

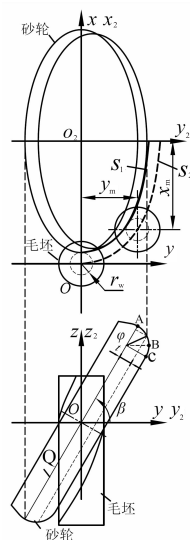


图4 机床加工位置

用 t 表示砂轮上任意薄片离圆心 o_2 的距离,用 $R(t)$ 表示砂轮的半径,它是 t 的函数,表示任意截面形状的砂轮。砂轮薄片在 $x_2 - o_2 - y_2$ 平面中的投影用参数方程(椭圆方程)可表示为

$$\begin{cases} x_2 = R(t) \cos \theta \\ y_2 = R(t) \cos \beta \sin \theta + t \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 是这个砂轮薄片上对应点的圆周角。

所有砂轮投影的外部轮廓用平面曲线族的包络方程来表示^[14]为

$$\partial x_2 / \partial \varphi \times \partial y_2 / \partial \theta - \partial y_2 / \partial \varphi \times \partial x_2 / \partial \theta = 0 \quad (2)$$

由式(1)计算式(2)中的偏导,包络方程(2)化简为

$$R'_1 t \cos \theta + (R'_1 t \sin \theta + \tan \beta) \tan \theta = 0 \quad (3)$$

式中, R'_1 表示函数 $R(t)$ 对变量 t 的一阶导数。对于砂轮上任意一薄片对应的 t 值,都可以由式(3)计

算出它对应的包络角 θ , 将它代入式(1)中, 得到包络点。联立式(3)和式(1), 所有包络点的连线构成了砂轮投影的边缘, 记作投影曲线 S_1 。

如图 4 所示, 在初始位置时, 如果将砂轮看作固定不动, 在 $x_2 - o_2 - y_2$ 平面内移动钻头, 这实际上是同时改变砂轮的中心距 A 和偏心距 T_1 。用移动后钻头轴线的坐标值 x_m 和 y_m 记录砂轮和钻头的相对位置为

$$\begin{cases} x_m = -A \\ y_m = T_1 \sin \beta \end{cases} \quad (4)$$

在 $x_2 - o_2 - y_2$ 平面上作曲线 S_1 的等距曲线 S_2 , 它们之间的距离等于芯厚半径 r_w 。如果钻头的中心始终位于这条等距曲线 S_2 上, 这保证了砂轮和钻头中心之间芯厚半径的关系, 即钻头轴线的坐标值 x_m 和 y_m 满足曲线 S_2 的方程。投影曲线 S_1 用 t 的参数方程表示为

$$\begin{cases} x_{s1}(t) = R(t) \cos \theta \\ y_{s1}(t) = R(t) \cos \beta \sin \theta + t \sin \beta \end{cases} \quad (5)$$

θ 满足式(3), 投影曲线 S_1 是平面曲线, 其等距曲线用微分几何计算^[12]。 S_1 上任意一点的法矢 n 可表示为

$$n = (-y'_{s1} / \sqrt{x'^2_{s1} + y'^2_{s1}}, x'_{s1} / \sqrt{x'^2_{s1} + y'^2_{s1}}) \quad (6)$$

式中, x'_{s1} 和 y'_{s1} 表示曲线 S_1 的坐标分量对变量 t 的一阶导数。等距曲线 S_2 的参数方程为

$$\begin{cases} x_{s2} = x_{s1} + r_w y'_{s1} / \sqrt{x'^2_{s1} + y'^2_{s1}} \\ y_{s2} = y_{s1} - r_w x'_{s1} / \sqrt{x'^2_{s1} + y'^2_{s1}} \end{cases} \quad (7)$$

钻头中心的坐标值 x_m 和 y_m 满足式(7), 将式(4)代入式(7), 有

$$\begin{cases} A = -(x_{s1} + r_w y'_{s1} / \sqrt{x'^2_{s1} + y'^2_{s1}}) \\ T_1 = (y_{s1} - r_w x'_{s1} / \sqrt{x'^2_{s1} + y'^2_{s1}}) / \sin \beta \end{cases} \quad (8)$$

由式(5)求导数代入式(8), 得到 x'_{s1} 和 y'_{s1} 的解析表达式。

2.3 满足给定径向前角 γ_0

在满足以上芯厚的条件下, 中心距 A 和偏心距 T_1 两个参数用变量 t 来表示。只要给定 t 值, 由式(8)即可唯一确定 A 和 T_1 。

以 t 作为变量, 构造一个目标函数 $f(t)$, 有

$$\min f(t) = [\gamma(t) - \gamma_0]^2 \quad (9)$$

式中, γ_0 是给定的径向前角。径向前角 γ 由横截面曲线在外缘转点处的切线用数值求导的方法得到。采用一维搜索的方法求解单变量的最优化问题, 得到满足给定径向前角的 t 值。

3 槽型几何分析

在砂轮切片、砂轮作螺旋运动的过程中, 每片砂轮在横截面上形成一条加工轨迹。槽型横截面曲线即是这些加工轨迹的叠加所形成的外部轮廓^[12] (见图 5)。经大量计算表明, 根据槽型横截面曲线弯曲的形状, 可分成 I 型和 II 型两类。从钻头的圆心向外观察, I 型是一条光滑的凹曲线, 它单一地由砂轮的圆弧部分包络形成; II 型则由两段组成, 在外缘段是一条光滑的凹曲线, 同样由砂轮的圆弧部分包络形成, 后段则是砂轮的外圆柱面干涉形成的一段凸曲线。

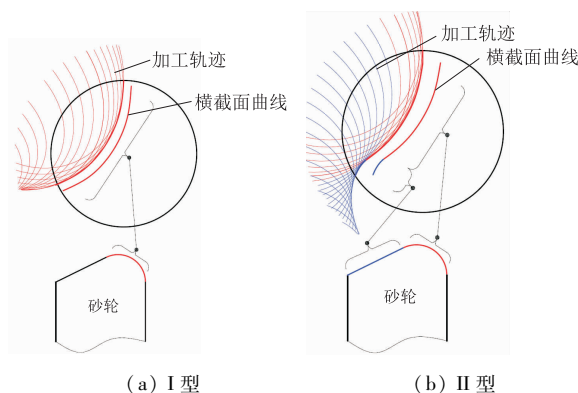


图 5 螺旋槽横截面曲线

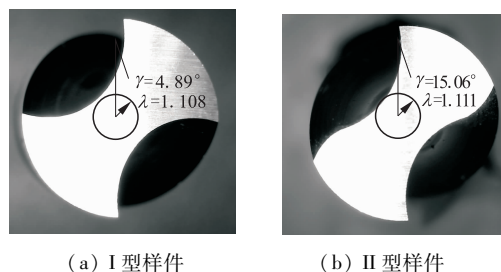


图 6 加工样件横截面

螺旋槽设计的困难在于 A 、 T_1 和 β 三个加工参数同时对槽型有影响, 没有简便的方法可以将其分离。只要加上一个前提, 在满足指定的芯厚和前角的约束条件下, 即可确定其中的两个参数 A 和 T_1 的值。添加这个简化问题的前提后, 可以单独分析安装角 β 的变化对槽型的影响。将相同芯厚和前角的槽型放在同一横截面内比较, 可以直观地反映槽型的变化规律。

在实际生产中, 芯厚和前角总是在一定范围内取值, 各类加工手册^[12] 列出了钻削不同材料、芯厚半径和前角的推荐值, 例如加工钢件的硬质合金麻花钻, 芯厚半径一般取直径的 0.25 - 0.27 倍, 前角取 15° - 20°。根据这些给定的经验值绘制出各类槽型曲线图谱, 在生产中可以根据这类图线选择合适的加工参数。

3.1 加工实例

按表1给出的钻头和砂轮尺寸加工得到满足指定芯厚和前角的钻头槽型横截面曲线。迭代过程见表2,计算的结果和实际磨削样件测量的结果对比见图6和表3。在迭代21次后,计算的精度达到 $\varepsilon = 10^{-4}$,实验结果表明,加工样件的芯厚和径向前角测量值和设定值的误差不超过2.2%。

表1 钻头和砂轮尺寸

钻头直径 d (mm)	钻头螺旋角 δ (°)	砂轮半径 r (mm)
7.988	30	123.290/2
砂轮宽度 W (mm)	砂轮圆弧半径 ρ (mm)	砂轮斜角 λ (°)
12.136	0.13	70

表2 数值迭代值

序号	t	$f(t)$
1	0.119740	28.6162
2	0.103710	19.1794
3	0.0905729	10.0857
10	0.0780626	0.0347474
15	0.0781006	0.00272582
19	0.0780978	1.18713e-5
21	0.0780977	4.74384e-5

表3 钻头的设计值和测量值的对比

试件	参数	设计值	测量值	误差 (%)
I型样件	半芯厚 r_w (mm)	1.100	1.108	0.73
	径向前角 γ (°)	5.00	4.89	2.20
II型样件	半芯厚 r_w (mm)	1.100	1.111	1.00
	径向前角 γ (°)	15.00	15.06	0.40

3.2 加工参数对槽型的影响

图7中四个模拟实例显示了安装角 β 的变化对槽型的影响,加工尺寸仍按表1。其中,图7a和7b反映在满足相同芯厚半径 $r_w = 1.1$,而前角分别为 $\gamma = 0^\circ$ 和 $\gamma = 15^\circ$ 时,安装角 $\beta \in [40^\circ, 60^\circ]$ 范围内取值时槽型的变化。当安装角 β 接近 60° (螺旋角 δ 的余角)时,槽型横截面曲线是I型,为一条光滑的凹曲线,但在图7b中随着安装角 β 的减小,砂轮外圆柱面的干涉部分逐渐进入钻头直径范围内,槽型变为II型,并且随干涉部分的增大,槽型后部凸起明显,槽宽角也随之逐渐增大(见图8);对于给定前角 $\gamma = 0^\circ$ 和 $\gamma = 15^\circ$ 两种情况,都有相同的变化趋势,但较之前角 $\gamma = 0^\circ$ 的情况,选用相同安装角情况下满足前角 $\gamma = 15^\circ$ 的横截面曲线中的后部凸起部分明显增大。

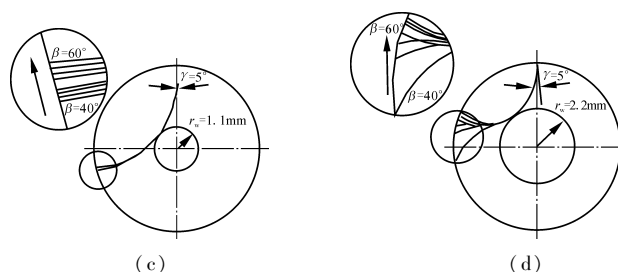
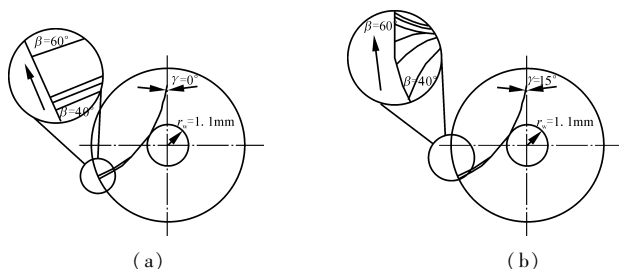


图7 安装角 β 对槽型曲线的影响

图7c和7d则是在满足相同前角 $\gamma = 5^\circ$,芯厚半径分别为 $r_w = 1.1$ 和 $r_w = 2.2$ 条件下槽型随安装角变化的情况。当芯厚半径增大,槽型缩小到第二象限,槽宽角显著减小,排屑空间减小。当安装角 $\beta \in [40^\circ, 50^\circ]$ 范围,芯厚半径 $r_w = 1.1$ 时槽型横截面曲线是I型,但在 $r_w = 2.2$ 时则为II型,图9反映出此时槽宽角随安装角 β 的增大而减小的趋势明显。

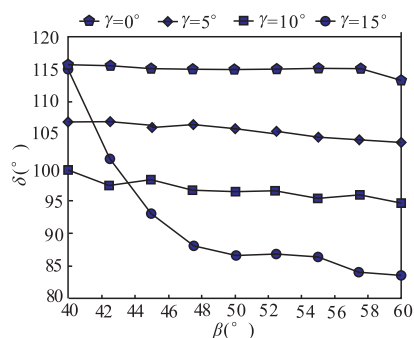


图8 相同芯厚条件下槽宽角的比较

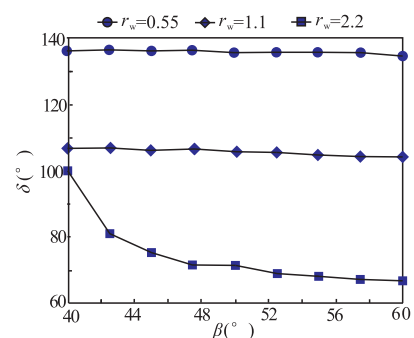


图9 相同前角条件下槽宽角的比较

3.3 砂轮几何参数对槽型的影响

图10四个模拟实例分别显示了砂轮半径 r 、宽度 W 、圆角半径 ρ 和斜角 λ 等砂轮几何参数的改变对槽型的影响。图10a中,当砂轮的半径 r 由 $\phi 40$ 增大到 $\phi 130$ 时,满足相同的芯厚半径 $r_w = 1.1$ 和前角 $\gamma = 1.1$,槽宽角只增大了5%,说明砂轮半径 r 的变化对槽型影响很小。这对磨削砂轮的选择有指导意义:在实际加工中,砂轮的外径一直有磨损,但在半径较大的变动范围内都可以通过调整计算过程中半径输入值计算出对应的槽型。砂轮半径的变化对

加工结果不敏感。

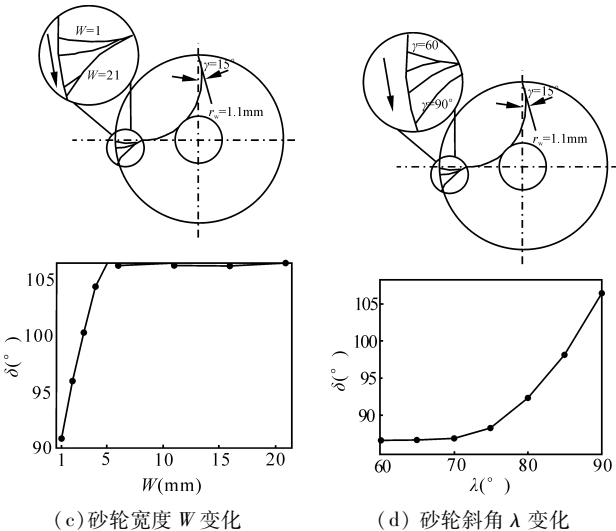
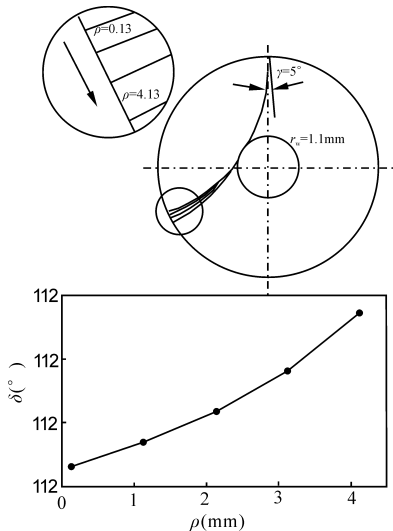
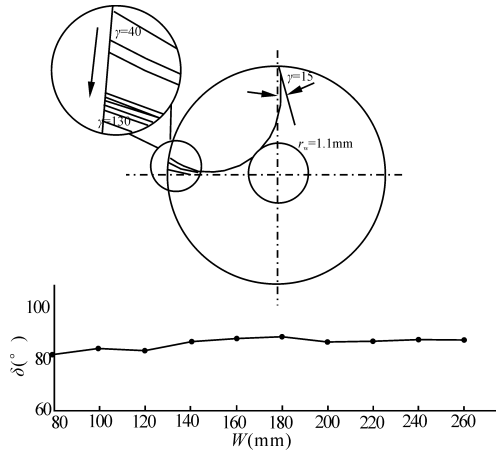


图 10 砂轮几何形状对槽型的影响

在图 10b 中,当砂轮圆角半径 $\rho \in [0.13, 4.13]$ 范围内增大时,砂轮的槽宽角随之接近线性地增大;在图 10c 中,当砂轮宽度 W 较小时,只有砂轮圆弧部分参与形成螺旋槽,槽型横截面曲线是 I 型;随着

砂轮宽度 W 的增大,砂轮的外圆柱面切去槽后段的一部分,干涉形成凸曲线,使槽型变为 II 型;在图 10d 中,砂轮斜角 λ 的影响和砂轮宽度 W 的影响相似,在砂轮宽度 W 相同、砂轮斜角 λ 由 60° 逐渐增大到 90° 时,原来只有砂轮圆弧部分参与的磨削变成两段,前段由砂轮圆弧部分形成,后段由砂轮的外圆柱面干涉形成。

4 结语

在满足指定芯厚和径向前角条件下,本文解决了用 1V1/1A1 标准砂轮精确计算砂轮的安装位置的几何问题。基本的思想是有效地将两个条件分离,将安装位置的调整看成钻头中心沿砂轮投影等距曲线的相对运动。将满足芯厚的条件转化为解析表达的约束条件,前角条件的满足则由一维搜索来决定。值得注意的是,由于采用了直接法建模,螺旋槽横截面和偏差的计算都变得简单,而微分几何提供了精确的计算途径。

加工样件测量的结果和数值仿真的结果比较可知,最大误差不超过 2.5%,验证了以上方法的有效性。同时,比较了满足相同芯厚和前角的条件下,槽型随安装角和砂轮几何参数变化的趋势。本文提供了一种柔性磨削螺旋槽的可能,即用不同形状的砂轮可以加工出具有相同几何参数的沟槽,而且已经和国内磨床生成厂商合作,植入数控工具磨床的操作系统。将上述方法进一步应用于其它复杂形状的砂轮,可以形成槽型加工的性能图谱,帮助操作人员选择合适的砂轮磨削指定的螺旋槽。

参考文献

[1] Kosmol J, Czech M, Klarecki K, et al. The optimisation of drills for the machining of austenitic steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89-90(2): 117-122.

[2] Kang S K, Ehmann K F, Lin C. A CAD approach to helical groove machining-1: mathematical model and model solution [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1996, 36(1): 141-153.

[3] Ivanov V, Nankov G, Kirov V. CAD orientated mathematical model for determination of profile helical surfaces[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998, 38(8): 1001-1015.

[4] 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(1): 323-326.

车铣加工细长轴的振动特性分析

金成哲, 郭畅

沈阳理工大学

摘要: 应用正交车铣可以实现细长轴等弱刚度零件的高速和精密切削加工, 可作为传统车削加工的替代加工方法。针对细长轴类零件的正交车铣加工, 建立了考虑刀具—刀柄—主轴结合面的电主轴以及不同装夹下的工艺系统的有限元模型, 并对不同切削参数以及不同装夹方式下的铣刀系统、工件以及工艺系统的幅频特性进行了分析。同时, 对比研究了在车铣和车削加工条件下工艺系统的幅频特性, 研究表明: 在不同装夹方式下车铣加工较车削加工的振动特性有很大改善, 研究结果为细长轴类零件的正交车铣加工应用打下理论基础。

关键词: 车铣; 细长轴; 振动特性; 工艺系统

中图分类号: TG506; TH161

文献标志码: A

Analysis of Vibration Characteristic of Turn-milling Slender Shaft

Jin Chengzhe, Guo Chang

Abstract: In this paper, the high speed and precision machining of slender shaft and other weak rigidity parts can be realized by orthogonal turn-milling, which can be used as an alternative machining method for traditional turning machining. In view of the slender shaft parts orthogonal turn-milling processing, considering cutting tool-handle-spindle for the motorized spindle and the finite element model of different clamping of the workpiece is set up. And the different cutting parameters and the milling cutter, workpiece and process system under different clamping way of amplitude frequency characteristics are analyzed. At the same time, the contrast research on turn-milling and turning processing under the condition of amplitude frequency characteristics of and process system have been done. The results show that the different clamping way out of the turn-milling has improve the vibration characteristics of turning processing, it lays the theoretical foundation for the application of the orthogonal turn-milling machining of slender shaft parts.

Keywords: turn-milling; slender shaft; vibration characteristic; process system

1 引言

目前, 细长轴类零件的切削加工以车削为主, 并

适当结合各种辅助支撑手段, 主要分为可调夹具的辅助支撑和组合夹具的辅助支撑, 近些年来又出现了射流辅助和双刀切削的加工方式^[1]。由于车削工艺自身的特点给其发展造成了诸多瓶颈, 比如切屑大小难以控制给自动化生产造成了困扰, 尤其是

基金项目: 辽宁省自然科学基金(20170540778)
收稿日期: 2018年2月

- [5] Zhang W, Wang X, He F, et al. A practical method of modeling and simulation for drill fluting[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(6): 667-672.
- [6] Li G, Sun J, Li J. Modeling and analysis of helical groove grinding in end mill machining[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2014, 214(12): 3067-3076.
- [7] 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.
- [8] Abele E, Fujara M. Simulation-based twist drill design and geometry optimization[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 145-150.
- [9] Karpuschewski B, Jandacka K, Mourek D. Automatic search for wheel position in flute grinding of cutting tools[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 347-350.
- [10] Li G. A new algorithm to solve the grinding wheel profile for end mill groove machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016: 1-10.
- [11] 李铸宇, 张伟, 贺凤宝, 等. 麻花钻螺旋槽数控加工中砂轮位置的自动搜索[J]. 大连工业大学学报, 2014(4): 305-308.
- [12] Patrikalakis N M, Maekawa T. Shape interrogation for computer aided design and manufacturing[M]. New York: Springer, 2002.

第一作者: 李铸宇, 讲师, 大连工业大学机械工程与自动化学院, 116034 辽宁省大连市

First Author: Li Zhuyu, Lecturer, School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China