

环形刀等残留高度多轴加工步距计算

郝小忠¹ Ahmed A A Duroobi² 陈文亮¹ 何磊¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 伊拉克科技大学产品工程与冶金系, 巴格达, 10001)

摘要: 针对不同曲面的环形刀多轴加工, 提出了最大步距计算的数学模型, 建立了残留高度为常数时步距与刀轴倾角之间的函数关系, 通过函数关系推导出最佳步距的值。实验表明, 该算法在保证加工精度的前提下, 能有效缩短加工刀轨路径, 提高加工效率。

关键词: 等残留高度; 环形刀; 步距; 多轴加工

中图分类号: TG659

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)04-0538-05

Calculation of Stepmover Based on Constant Scallop-Height in Multi-Axis Torus Milling Process

Hao Xiaozhong¹, Ahmed A A Duroobi², Chen Wenliang¹, Hei Lei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Department of Production Engineering & Metallurgy, University of Technology, Baghdad, 10001, Iraq)

Abstract: The theoretical model of the maximum stepover estimation is established for different cases on the machine surface profile using the end-filletted cutter in multi-axis machining. The function between the stepover and inclination angles of tool axis is constructed at constant scallop-height. According to the equations the optimum stepover is derived. Experimental results show that the presented algorithm is feasible. It can obtain shorter tool path and improve the quality of machining.

Key words: constant scallop-height; torus cutter; stepover; multi-axis machining

数控加工中零件表面质量和加工效率与刀具轨迹步距的选择息息相关。步距选择过大, 表面质量得不到保证; 步距选择过小, 加工时间成倍增加, 加工效率低。因此, 步距优化既要满足表面质量的要求, 又要有较高的加工效率。在数控加工中步距优化的主要方法有等参数法、等截面法和等残留高度法。等参数线法和等截面法为了达到加工的精度要求, 刀触点轨迹的分布是按照最小加工步距确定的, 而等残留高度法是在满足加工质量的前提下, 寻求相邻刀具路径间最大的加工步距, 效率较高^[1-3]。

等残留高度法在球头铣刀三轴加工中取得了较好的效果, 但在多轴加工中随着刀具回转轴线与表面接触点法向矢量之间角度的变化, 球头铣刀的有效半径保持不变, 造成了多轴数控机床加工能力的浪费^[4-6]。而环形刀在多轴加工中有着球头铣刀和平头端铣刀的双重优点, 环形刀在加工自由曲面的过程中, 随着刀轴矢量的变化, 刀具有效半径变大, 能显著增加切削速度, 改善加工区域条件, 提高切削效率和表面质量^[7-9]。因此, 本文综合考虑刀轴矢量、切削接触点的曲率等信息, 研究环形刀在加工中产生均匀残留高度时, 能达到的最大加工步距, 实现多轴数控加工刀具轨迹步距的优化。

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX04010041)资助项目; 国家自然科学基金(50905087)资助项目; 航空基金(2010ZE52057)资助项目; 中央高校基本科研业务费专项基金(NZ2012117)资助项目。

收稿日期: 2011-09-26; **修订日期:** 2012-01-05

通讯作者: 郝小忠, 男, 博士研究生, 工程师, 1980年生, E-mail: xhao@nuaa.edu.cn。

1 刀具轨迹步距求解

1.1 刀轴倾角定义

从图1,2中可以看出,在加工中刀具分别定义两个不同的刀轴矢量。在图1中,当多轴加工时,刀具矢量沿着工件各个切削接触点的法线方向加工,切削发生在刀具的头部位置,切削状态较差;在图2中,刀轴矢量倾斜于加工表面切削接触点法线方向一个角度 λ ,即刀轴倾角 λ 是在X-Z平面上刀轴矢量与Z轴之间的夹角,当选择合理刀轴倾角时,切削发生在环形刀的圆角刃上,切削状态较好,加工表面质量高。选择不同的刀轴倾角时,加工的步距会随着改变。因此,需要建立步距与刀轴倾角的函数关系,合理选择刀轴倾角,从而达到优化加工步距的目的。

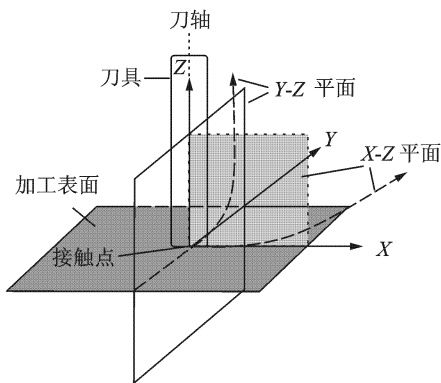


图1 刀轴垂直于加工表面

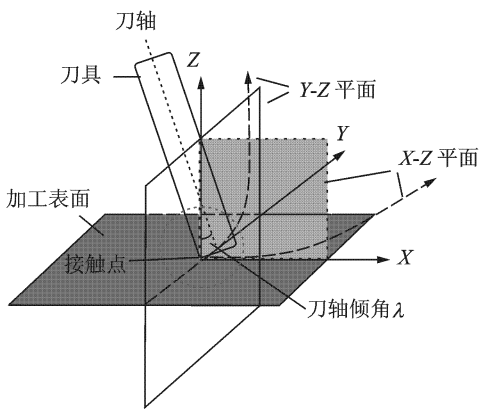


图2 刀轴倾斜于加工表面

1.2 刀具有效半径

在环形刀加工零件时,随着刀轴倾角 λ 的改变,如图3所示,环形刀截面轮廓在A-A剖面内为一近似椭圆。在此平面内,可以用半径为 R_c 的圆弧来近似代替CC点附近的刀具轮廓,称此圆弧半径

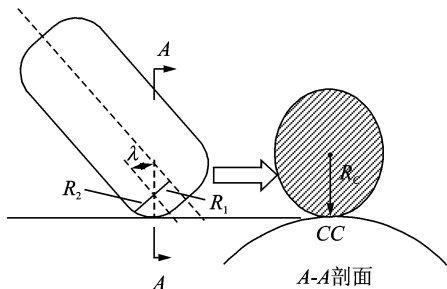


图3 环形刀有效半径

R_c 为环形刀的有效半径^[10-11],经推导得

$$R_c = \frac{R_1}{\sin \lambda} + R_2 \quad (1)$$

式中: R_1 为刀具平底部分的半径; R_2 为圆角半径; λ 为刀轴倾角。

因此,根据被加工曲面曲率半径的具体情况,通过调整刀轴倾角,用一把环形刀可以得到一系列不同半径球头铣刀的切削效果。

1.3 有刀轴倾角步距的计算

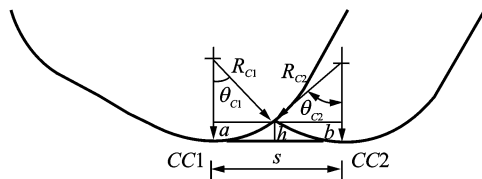
1.3.1 平面加工步距的计算

当刀具倾斜于加工表面时,步距大小将会随着刀轴倾角的改变而变化,环形刀铣削加工时相邻两个连续刀具轨迹运动的交叉点有3种可能:(1)环形刀圆角与圆角相交,如图4所示;(2)圆角与底平面相交,如图5所示;(3)侧面与底平面相交,如图6所示。

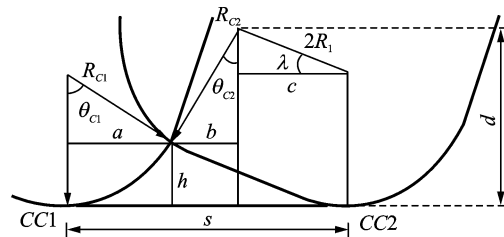
(1)圆角与圆角相交的步距

当两圆角相交时有两种情况:

①残留高度产生于刀具同一侧圆角之间,如图4(a)所示,这种情况类似于半径为 R_c 的球头刀,推



(a) 相交发生在刀具同一侧



(b) 相交发生在刀具不同侧

图4 圆角与圆角相交步距图

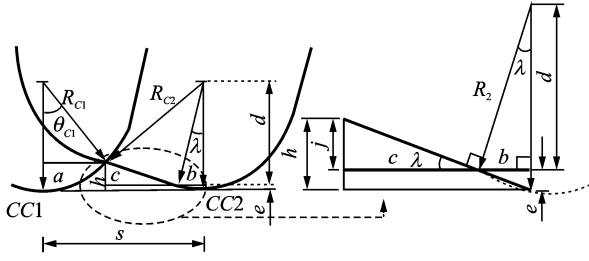


图5 圆角与底平面相交步距图

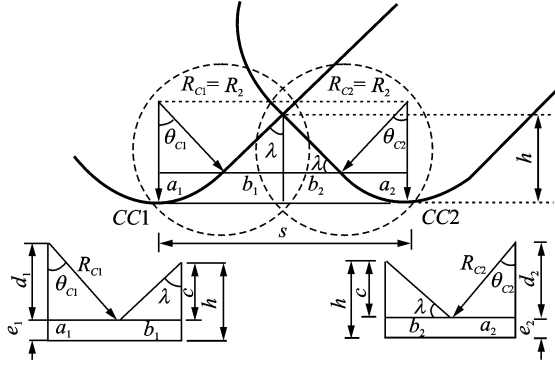


图6 侧面与底平面相交步距图

导步距 s 的计算公式如下

$$s = R_{C1} \sin \theta_{C1} + R_{C2} \sin \theta_{C2} \quad (2)$$

为了计算步距 s 的大小, 首先应该推导出 θ_{C1} 和 θ_{C2} 的大小。

$$\cos \theta_{C1} = \frac{R_{C1} - h}{R_{C1}} \Rightarrow \theta_{C1} = \arccos \left(\frac{R_{C1} - h}{R_{C1}} \right) \quad (3)$$

$$\cos \theta_{C2} = \frac{R_{C2} - h}{R_{C2}} \Rightarrow \theta_{C2} = \arccos \left(\frac{R_{C2} - h}{R_{C2}} \right) \quad (4)$$

式中: R_{C1} 和 R_{C2} 为环形刀有效半径; h 为残留高度值。

②当相交发在刀具不同侧圆角时, 这时环形刀的底平面对残留高度产生影响, 如图4(b)所示, 推导步距 s 的计算公式如下

$$s = a + b + c = R_{C1} \sin \theta_{C1} + R_{C2} \sin \theta_{C2} + 2R_1 \cos \lambda \quad (5)$$

式中 θ_{C1} 通过式(3)得到, 故

$$\theta_{C2} = \arccos \left(\frac{R_2 + 2R_1 \sin \lambda - h}{R_{C2}} \right)$$

(2)圆角与底平面相交的步距

从图5中可以得出

$$s = a + b + c = R_{C1} \sin \theta_{C1} + R_2 \sin \lambda + j / \tan \lambda \quad (6)$$

式中 θ_{C1} 通过式(3)得到, 故

$$j = h - e = h - (R_2 - d) = h - R_2 + R_2 \cos \lambda = h - R_2 (1 - \cos \lambda)$$

(3)侧面与底平面相交时的步距

从图6得知

$$s = a_1 + b_1 + b_2 + a_2 = R_{C1} \sin \theta_{C1} + c \tan \lambda + c / \tan \lambda + R_{C2} \sin \theta_{C2} \quad (7)$$

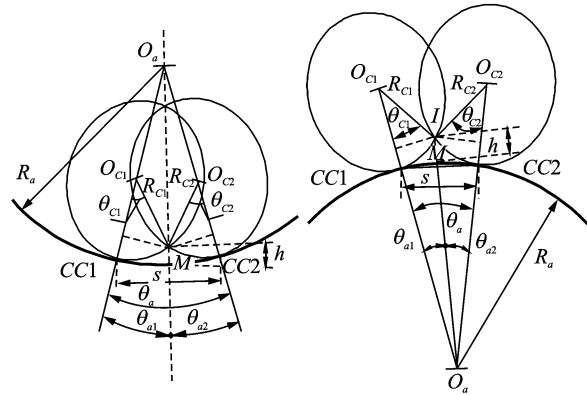
式中: $\theta_{C1} = 90 - \lambda, \theta_{C2} = \lambda$;

$$c = h - e = h - R_2 + d = h - R_2 + R_2 \cos \lambda = h - R_2 (1 - \cos \lambda)$$

零件表面质量的要求决定了允许的最大残留高度值, 取 $h = 0.8 \times h_{\max}$, 通过以上公式, 建立了刀具轨迹步距与最大允许残留高度、环形刀有效半径及刀轴倾角之间的关系。通过合理选择刀具直径、刀轴倾角, 在满足表面质量的前提下, 求得允许最大步距 s , 这样可以用最短的时间加工出合格的零件。

1.3.2 曲面加工步距的计算

自由曲面的步距计算除了要考虑刀具直径、刀轴倾角, 还需要考虑曲面的形状及曲率半径。本文主要研究凹面和凸面的步距计算方法, 如图7所示, 建立刀具有效半径和曲面曲率半径与加工步距之间的关系。



(a) 刀具加工凹面图

(b) 刀具加工凸面图

图7 刀具加工曲面步距图

从图7(a)中可以推导出凹面步距方程如下

$$s = 2R_a \cdot \sin \left(\frac{\theta_a}{2} \right) = 2R_a \cdot \sin \left(\frac{\theta_{a1} + \theta_{a2}}{2} \right) \quad (8)$$

$$\theta_{ai} = \arccos \left(\frac{R_a - (R_{Ci} - R_{Ci} \cos \theta_{Ci})}{(R_a - h)} \right) \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

因为

$$\overline{O_a I} = \sqrt{[R_{Ci} \cdot \sin \theta_{Ci}]^2 + [(R_a - R_{Ci}) + (R_{Ci} \cdot \cos \theta_{Ci})]^2} = R_a - h$$

所以

$$\cos \theta_{Ci} = \frac{-R_{Ci}^2 - (R_a - R_{Ci})^2 + (R_a - h)^2}{2(R_a - R_{Ci})R_{Ci}} \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

式中: R_a 为凹面切削接触点的曲率半径; R_{C1} 和 R_{C2} 为环形刀有效半径; h 为残留高度值。

从图7(b)可以推导出凸面步距方程如下

$$s = 2R_a \cdot \sin\left(\frac{\theta_{a1} + \theta_{a2}}{2}\right) \quad (11)$$

$$\theta_{ai} = \arccos\left(\frac{R_a + (R_{Ci} - R_{Ci}\cos\theta_{Ci})}{(R_a + h)}\right) \quad (12)$$

$i = 1, 2$

因为

$$O_a I =$$

$$\sqrt{[R_{Ci} \cdot \sin\theta_{Ci}]^2 + [R_a + (R_{Ci} - R_{Ci} \cdot \cos\theta_{Ci})]^2} =$$

$$R_a + h$$

所以

$$\cos\theta_{Ci} = \frac{R_{Ci}^2 + (R_a + R_{Ci})^2 - (R_a + h)^2}{2(R_a + R_{Ci})R_{Ci}} \quad (13)$$

$i = 1, 2$

式中: R_a 为凸面切削接触点的曲率半径; R_{C1} 和 R_{C2} 为环形刀有效半径; h 为残留高度值。

因为最大允许残留高度是确定的,所以 h 值是确定的,通过式(9,10,12,13)即可求出 θ_{a1}, θ_{a2} 角的大小。将 θ_{a1}, θ_{a2} 代入式(8,11)即可建立加工步距与曲面曲率半径及环形刀有效半径之间的函数关系,而刀具有效半径在加工中是随着刀轴倾角不断改变的,因此通过式(1)的函数关系,可以求出不同刀轴倾角下的加工步距,从中选取获得最大加工步距的刀轴倾角为刀轴矢量,实现任意切削接触点的加工步距优化。按一定精度离散加工表面生成切削接触点序列,对序列中的每一个点进行上述优化,确定一切削接触点的最佳刀轴矢量,求出满足加工质量下的最大动态步距。

2 实验及分析

应用 Matlab 软件,计算 $h = 0.5 \text{ mm}$, $R_1 = 1 \text{ mm}$, $R_2 = 2 \text{ mm}$, 刀轴倾角分别取 $[0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ]$ 时的步距,并根据计算的步距在 UCP710 五坐标高速加工中心上加工 3 类面(平面、凹面、凸面)共 12 件试件,加工试件如图 8 所示。加工后测量残留高度值均在 $(0.5 \pm 0.02) \text{ mm}$, 说明本文建立的等残留高度计算步距的公式是正确的,为复杂曲面零件动态选取最合适的加工步距提供了依据。

图 9 运用本文的方法描述了凹面曲率半径、刀轴倾角与加工步距的关系。由图 9 可知,在特定情况下,刀轴倾角的变化对步距的影响达到了 2~3 倍。因此,实际加工中应充分发挥多轴数控机床的优势,实时动态地确定曲面各切削接触点的刀轴矢

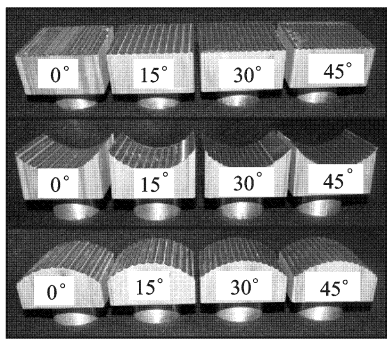


图 8 加工试件

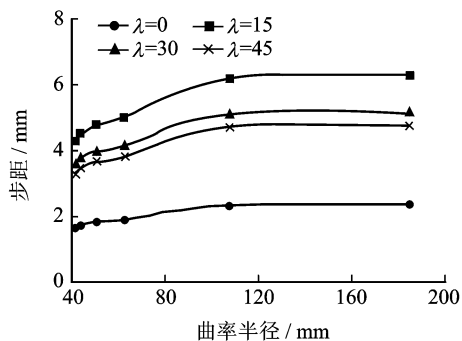
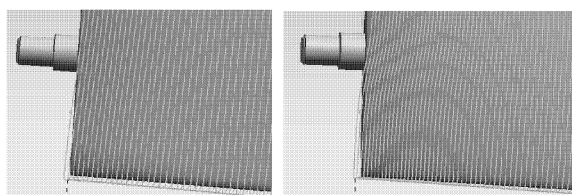


图 9 凹面曲率半径、刀轴倾角与步距关系图

量,提高复杂零件加工质量和加工效率。环形刀加工凹面时刀轴矢量与切削接触点的法向重合即刀轴倾角 $\lambda=0$ 时,步距值较小,加工效率低,因此环形刀刀轴矢量在不发生干涉的情况下,应尽量避免这一区域。

取某复杂叶片曲面的左边界线作为初始轨迹,按 0.01 mm 的精度离散生成切削接触点序列,分别优化确定刀轴倾角及加工步距生成刀具轨迹。图 10(a)所示为环形刀加工叶片的刀具轨迹计算结果,其中残留高度 $h=0.01 \text{ mm}$,环形刀几何尺寸为 $R_1=3 \text{ mm}$, $R_2=2 \text{ mm}$,所有切削接触点刀轴倾角和加工步距根据式(8,11)自动实时计算,刀具轨迹总长为 $17\,937.142 \text{ mm}$ 。图 10(b)所示为相同条件下固定刀轴倾角 $\lambda=5$ 时的叶片刀具轨迹,其轨迹总长达到 $21\,864.276 \text{ mm}$ 。由此可见,本文优化刀轴倾角方法计算得到的加工步距比传统方法大大



(a) 本文方法计算的刀轨 (b) 传统方法计算的刀轨

图 10 复杂叶片曲面刀具轨迹对比

增加,刀具轨迹数量有所减小,刀具轨迹长度减少了17.96%,且刀具轨迹光滑、刀轴矢量变化均匀,满足实际加工的要求。

3 结束语

本文研究了使用环形刀等残留高度加工不同曲面的最大步距,提出了理论模型及实验验证。实验结果表明,运用本文的研究结果,可以为不同类型的曲面选择各自的最合适的动态加工步距,为刀具参数、刀轴倾角选择提供参考,解决了实际加工中为兼顾局部而选用的一个较为保守的加工步距问题,减少了加工中的刀具轨迹长度,提高了加工效率,节约了加工成本。

参考文献:

- [1] Lin R S, Koren Y. Efficient toolpath planning for machining free-form surfaces [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1996, 118(1): 20-28.
- [2] Sarma R, Dutta D. The geometry and generation of NC tool paths [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1997, 119(2): 253-258.
- [3] 原恩桃, 廖文和, 刘浩. 细分曲面等残留高度刀轨规划 [J]. *机械科学与技术*, 2009, 28(9): 1143-1146.
Yuan Entao, Liao Wenhe, Liu Hao. Constant scallop-height tool path planning for a subdivision surface [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2009, 28(9): 1143-1146.
- [4] Yang D C H, Han Z. Interference detection and optimal tool selection in 3-axis NC machining of free-form surfaces [J]. *Computer-Aided Design*, 1999, 31(5): 303-315.
- [5] Lee K, Kim T J, Hong S E. Generation of tool path with selection of proper tools for rough cutting process [J]. *Computer-Aided Design*, 1994, 26(11): 822-831.
- [6] Schutzer K, Abele E, Stroh C. Using advanced CAM-systems for optimized HSC-machining of complex free form surfaces [J]. *Journal of Mech Sci & Eng*, 2007, 29(3): 313-319.
- [7] Roth D, Bedi S, Ismail F, et al. Surface swept by a toroidal cutter during 5-axis machining [J]. *Computer-Aided Design*, 2001, 33(1): 57-63.
- [8] Mann S, Bedi S. Generalization of the imprint method to general surfaces of revolution for NC machining [J]. *Computer-Aided Design*, 2002, 34(5): 373-378.
- [9] Cao Lixin, Gong Hu, Liu Jian. The offset approach of machining free form surface Part2: Toroidal cutter in 5-axis NC machine tools [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 184(1): 6-11.
- [10] Duroobi A A A. Scallop height emulation for multi-axis CNC milling operation [D]. Baghdad: University of Technology, 2009.
- [11] Abdulwahhab A A, Mohamed J H, Kazem B I. The mathematical description of end mill cutters and effective radius of tool geometry on multi-axis milling [J]. *Eng & Tech Journal*, 2010(2): 1581-1595.