

基于曲率拟合及变刀触点的防干涉四轴磨削算法

毛磊¹ 何卫² 周洁¹ 骆广进² 胡旭晓¹ 周哲平²

1. 浙江大学, 杭州, 310027 2. 杭州机床集团有限公司, 杭州, 310022

摘要:针对四轴数控磨削机床加工复杂曲面时的局部干涉问题,提出一种基于圆弧面砂轮的干涉检测与消除方法。基于对两种局部干涉的分析,首先根据曲率拟合要求确定最佳的相对刀轴方向以避免过切干涉,然后根据磨削点的法向量确定合适的刀触点以避免轴向干涉。利用 UG OPEN API 通过二次开发完成叶片叶盆表面的加工仿真,仿真结果表明,该方法切实可行,表面加工误差可小于 0.05mm。

关键词:局部干涉;圆弧面砂轮;曲率拟合;最佳刀轴方向;变刀触点

中图分类号: TG580.699

文章编号: 1004—132X(2011)17—2022—05

Curvature Fitting and Changing-TCpoints Based 4-Axis Grinding Algorithm

Mao Lei¹ He Wei² Zhou Jie¹ Luo Guangjin² Hu Xuxiao¹ Zhou Zheping²

1. Zhejiang University, Hangzhou, 310027

2. Hangzhou Machine Tool Group Co., Ltd., Hangzhou, 310022

Abstract: Aiming to the local interferences when grinding a curved surface in 4-axis CNC grinder, a method of interference detection and elimination was proposed based on an arcs surface grinding wheel. Through the analysis of interferences, firstly the optimum relative wheel-pivot was determined to avoid the undercutting according to the fitting requirements of curvature. Then the appropriate tool contact point (TCpoint) was found on the basis of the normal vector of grinding contact points (GCpoints), so that the axial interference is eliminated. Finally, a grinding simulation system was developed with UG OPEN API. The results indicate that surface errors are less than 0.05mm.

Key words: local interference; arcs surface grinding wheel; curvature fitting; optimum wheel-pivot orientation; changing-TCpoints

0 引言

复杂曲面被广泛应用于航天航空、造船、汽车、玻璃仪器、陶瓷以及模具等行业^[1]。目前,复杂曲面的加工以五轴数控铣床加工为主。在五轴数控铣床加工中,刀具干涉的检查与避免算法是复杂曲面加工的关键问题。国内外学者对此进行了很多研究。Lin 等^[2]通过比较刀触点处切平面上所有方向的加工表面的法向曲率和刀具包络面的法向曲率来找到无干涉的加工路径。Chen 等^[3]研究了 R 铣刀加工复杂曲面时避免两种局部干涉的方法。

在复杂曲面磨削领域,相关的研究相对较少,目前较常见的复杂曲面磨削还是以手工抛磨为主,比较先进的方法有六轴砂带磨削^[4],此外机器人和机械手在曲面抛磨加工中也开始得到应用^[5-6]。然而这些先进的磨削加工方法都需要很高的投资成本,且其加工算法也十分复杂。本文提出一种可以在四轴联动成形数控磨床上加工无曲率突变的自由曲面的无干涉加工算法。

1 磨削加工设备及干涉

1.1 加工设备及圆弧面砂轮结构

1.1.1 加工设备及其联动关系

本文涉及的机床是合作公司的七轴五联动数控磨床,其结构如图 1 所示。该成形磨床的五轴联动采用 4+1 方式,即 4 个直线轴 X、Y、Z、V(其中 V 轴是砂轮修整轴,本算法中暂不涉及砂轮修整)、1 个回转轴(B 轴),另外回转台倾角为定值,由 A 轴驱动,坐标系满足右手定则。

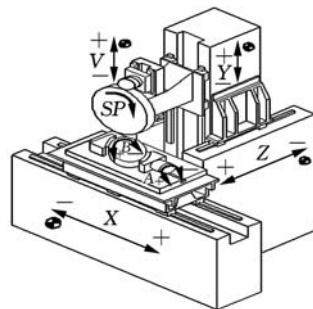


图 1 七轴五联动数控磨床的坐标系

加工时,将叶片固定在回转台上,保证叶片的一条长边与 Z 轴平行。加工的运动分配关系为:磨头完成直线运动 ΔY ,工件安装在回转台上完成直线运动 $\Delta X'$ 、 $\Delta Z'$ 以及旋转运动 $\Delta B'$ 。本算法不

收稿日期:2010—05—24

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX04014—026—04);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200803350028);浙江省科技重大专项(2008C01026—1)

涉及砂轮修整轴,故实际上该机床结构实现四轴联动。

1.1.2 圆弧面砂轮结构

采用的砂轮结构简图见图 2。该砂轮采用圆弧母线圆弧面结构。

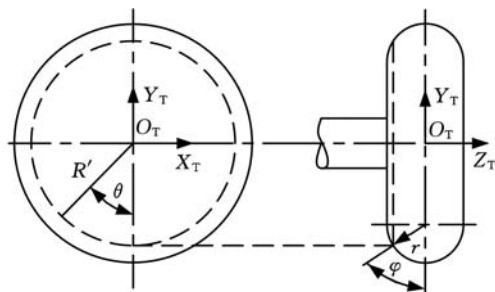


图 2 圆弧母线砂轮结构简图

在防干涉加工过程中,利用砂轮的圆弧表面来避免轴向干涉,同时以砂轮最大端面半径作为过切干涉的基准半径。由于砂轮半径越小越不容易发生干涉,所以本算法中不考虑砂轮修整的影响。

1.2 磨削干涉

将磨削加工中的干涉分为全局干涉和局部干涉。全局干涉是指砂轮端面或轴杆与加工表面以及加工环境中的夹具等发生碰撞。局部干涉又可分为过切干涉和轴向干涉。

其中,过切干涉是由于局部加工表面曲率半径小于砂轮半径而引起切除多余材料的情形,如图 3 所示;轴向干涉是由砂轮厚度引起的,或者在本文涉及的圆弧面砂轮中,是由刀触点法向量不一致引起的,如图 4 所示。



图 3 过切干涉

实际上将砂轮母线改成圆弧形式已在一定程度上减小了砂轮母线为直线母线形式时的轴向干涉。

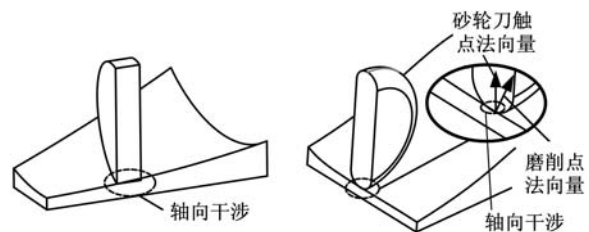


图 4 轴向干涉

2 过切干涉的检查及消除

根据引起过切干涉的原因,可以从两个角度来避免干涉。最容易想到的就是减小砂轮半径,但是自由曲面的曲率变化有时是很显著的,要完

成整个曲面的磨削加工,有时可用的砂轮半径就要取得很小。砂轮半径过小会带来很多问题,如加工效率将大大降低、表面粗糙度由于残余高度的加大将受到影响,此外如砂轮半径过小,则要求主轴转速很高才能满足切削速度的要求,这就对砂轮主轴的刚度提出了很高的要求,因而提高了加工成本。为此本文提出一种新的方法来消除过切干涉。

2.1 过切干涉检查

计算加工曲面各点的曲率半径,理论计算方法可参考微分几何中的曲面第一基本量和第二基本量相关内容^[7],这里不赘述。

本文利用 UG 软件通过二次开发获取加工曲面各点参数,通过 `UF_MODL_ask_curve_points()` 获取等参数加工路径的参数,包括该等参数线上各点的曲率半径,记为 `rad_of_cur`;利用 `UF_MODL_ask_face_props()` 获得磨削点主曲率,记为 k_1, k_2 ,法向量记为 n ,加工点坐标值记为 C_{point} 。

过切干涉仅发生在凹区域,因此根据曲面凹区域满足的条件确定需要检查干涉的磨削点。对于凸区域则不需要进行过切干涉检查,直接进入刀位点进行计算即可。判断方式如下:

$$\text{if } \begin{cases} K = k_1 k_2 \geq 0 \\ H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) > 0 \end{cases} \text{ Interference detection();}$$

$$\text{else Calculate Tool_point();}$$

砂轮端面的初始位置与加工轨迹线平行,因此当砂轮半径大于加工轨迹线上磨削点的曲率半径时会发生干涉,另外加工轨迹线上其他点的曲率半径发生突变时也会引起干涉,如图 5 所示。

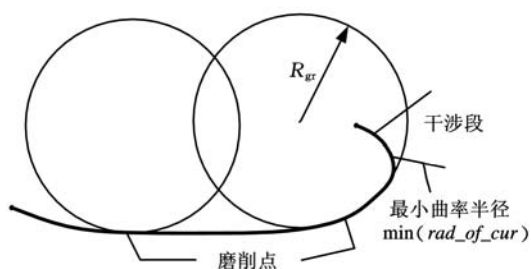


图 5 过切干涉检查示意图

因此,干涉检查过程如下:首先,对于每一条参数曲线,取 $\min\{rad_of_cur\}$,记为 ρ_{min} ,并获取该最小曲率点坐标,计算该坐标与磨削点坐标沿砂轮端面的距离 d_1 ;对于每一个磨削点,如果 $rad_of_cur < R_{gr}$ (R_{gr} 为砂轮的实际加工曲率半径)则发生干涉,如果 $rad_of_cur > R_{gr}$ 则继续进

行判断,如果 $d_t < R$ (R 为砂轮的最大加工曲率半径) 且 $\min(\text{rad_of_cur}) < R_{gr}$ 则发生干涉,其他情况则通过干涉检查。

2.2 过切干涉消除

过切干涉的消除主要基于曲率拟合的条件,通过调整砂轮端面与加工轨迹面的夹角来消除。

(1) 计算砂轮的实际加工曲率半径 R_{gr} 。由于本文算法适用的机床为固定刀轴方向——沿 Z 轴负方向,而回转台带倾角回转的数控磨床结构,因此,磨削点法向量与砂轮端面存在夹角,对砂轮半径有放大作用,如图 6 所示。根据该法向截面上投影椭圆的曲率半径即可求得砂轮实际加工半径:

$$R_{gr} = R / \sin \gamma \quad (1)$$

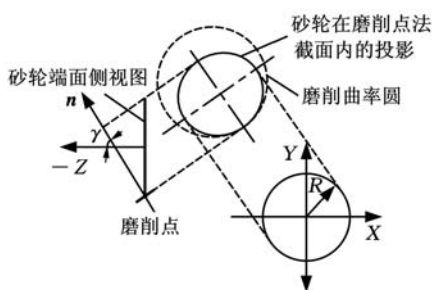


图 6 砂轮实际加工半径

(2) 计算磨削点等参数方向与最小曲率方向夹角。根据微分几何知识,对于自由曲面上任意一点都有两个主曲率,记为 k_1, k_2 ($k_1 < k_2$),它们的切向即为两个主方向。由于曲面是连续的,故将曲面凹区域的磨削点定义为凹椭圆点。根据欧拉定理,曲面上任意点在其切平面上任意方向具有不同的曲率半径,其范围在 $1/k_1 \sim 1/k_2$ 之间连续变化,如图 7 所示,则磨削点等参数方向的曲率可根据下式计算^[8]:

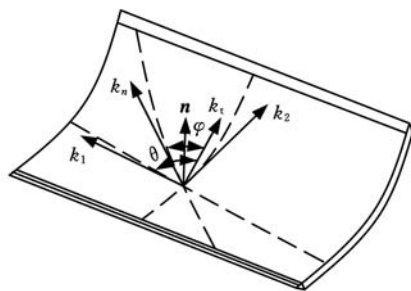


图 7 磨削点曲率的连续变化

$$k_t = k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta$$

式中, θ 为 k_t 所在方向与 k_1 所在方向的夹角。根据 2.1 节获得的参数可以求得磨削点等参数方向的 k_t 与最小曲率方向的夹角:

$$\theta = \arccos \sqrt{\frac{k_t - k_2}{k_1 - k_2}} \quad (2)$$

根据 2.1 节干涉检查结果,发生过切干涉有两种

情况,前者取 $k_t = \frac{1}{\text{rad_of_cur}}$, 后者取 $k_t = \frac{1}{\min(\text{rad_of_cur})}$ 。分别代入式(2)求得 θ 。

(3) 计算满足曲率拟合的最佳磨削截面。设最佳截面方向的曲率为 k_{fit} , 则最佳截面方向与最小曲率方向的夹角为

$$\lambda = \arccos \sqrt{\frac{k_{fit} - k_2}{k_1 - k_2}} \quad (3)$$

$$k_{fit} = 1/R_{gr}$$

代入式(1)得

$$k_{fit} = \sin \gamma / R$$

因此,等参数加工轨迹截面与最佳磨削截面的夹角 $\varphi = \theta - \lambda$ 。

这样就找到了无干涉加工截面。通过回转台的旋转运动令该截面与砂轮端面平行就能消除过切干涉。接下来根据机床旋转运动的形式反解计算回转台旋转量。

3 轴向干涉的检查与消除

上述过切干涉消除确定了刀轴方向,消除了曲面 k_2 方向上的干涉,但在 k_1 方向上还可能存在干涉。对于图 2 所示砂轮结构,由于在 k_1 方向上砂轮圆弧面的曲率半径一般小于曲面的曲率半径,所以不考虑过切干涉,只需考虑轴向干涉。轴向干涉是由于加工点法向量与刀触点法向量不一致引起的,如图 8 所示。

消除该类干涉的关键就是找到合适的刀触点。每一个磨削点会对应不同的刀触点,根据磨削点的法向量求得调整后的刀触点,然后通过平移将合适的刀触点平移到与磨削点重合,即可实现无干涉的加工,如图 9 所示。该方法只需要四轴联动即可完成加工。

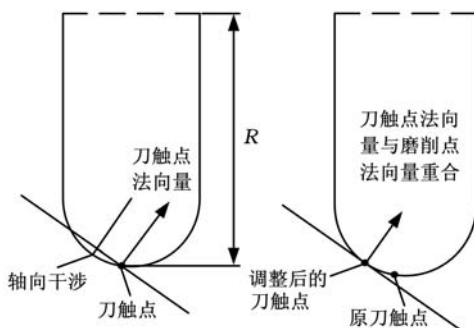


图 8 法向量不一致引起的轴向干涉

图 9 调整刀触点避免轴向干涉

4 叶片曲面磨削仿真实例

4.1 叶片磨削仿真软件

叶片加工仿真软件界面见图 10, 主要由刀位



图 10 叶片磨削仿真软件界面

点计算模块、加工参数设置及仿真模块组成。

刀位点计算模块包含了上述防干涉磨削算法的相关代码,由该模块生成加工轨迹;然后用“生成刀具”按钮建立砂轮的参数化模型;加工参数设置及磨削仿真模块完成砂轮模型与叶片表面模型的快速差集运算。加工仿真过程如图 11 所示,加工过程数据(刀轨)如图 12 所示。本仿真软件结合机床的运动形式,通过砂轮的平移运动和叶片绕回转台固定回转轴的转动,四轴联动完成加工过程的仿真。图 12 中前三列数据显示的是实时平移量,最后一列显示的是实时回转台旋转量。

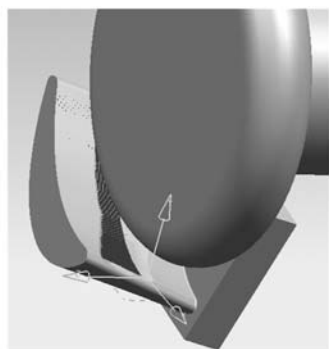


图 11 仿真时砂轮正磨削叶片表面



图 12 叶片磨削加工仿真实时数据截图

4.2 叶片表面形状精度分析

利用 UG 偏差测量模块分析磨削仿真加工后的叶片表面。磨削仿真采用直径 50mm、圆弧半径 5mm 的砂轮,并设置 U 向进给量为 0.5mm, V 向进给量为 1mm。仿真磨削加工后叶片表面的

形状偏差最大为 0.0508mm,最小为 0.00025mm,由此可知磨削仿真精度达到 0.05mm,且消除了加工中的过切和干涉。

5 结论

(1)提出了曲面磨削中过切干涉和轴向干涉的概念及其形式,并给出其各自的干涉消除方法。

(2)提出寻找曲面合适的曲率方向,通过旋转运动使其与砂轮端面平行来消除过切干涉的方法,这样就可以采用较大直径的砂轮而不需规定砂轮半径小于加工曲面的最小半径,有效地减小了残留高度,提高了加工表面质量,并提高了加工效率。

(3)设计了一种圆弧母线圆弧面结构的砂轮,使得整个圆弧面作为工作表面,可以方便地找到能与磨削点法向量一致的刀触点从而完成无干涉拟合,使得在四轴联动数控磨床上进行扭转叶片的加工成为可能。

参考文献:

- [1] Wu Fuzhong. Five-axis Tool Path Planning by Free Form Curve Offset in Surface[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Qingdao, 2008: 559-563.
- [2] Lin Than, Lee Jae-Woo, Bohez E L J. A New Accurate Curvature Matching and Optimal Tool Based Five-axis Machining Algorithm[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23: 2624-2634.
- [3] Chen Tao, Ye Peiqing, Wang Jinsong. Local Interference Detection and Avoidance in Five-axis NC Machining of Sculptured Surfaces [J]. International Journal of Advantage Manufacture Technology, 2005, 25: 343-349.
- [4] 石璟. 面向叶片加工的数控砂带抛磨系统的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [5] Zhao Yang, Zhao Ji, Zhang Lei. Path Planning for Automatic Robotic Blade Grinding [C]//International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, 2009: 1556-1560.
- [6] Choi B O, Lee M K. Development of a Hybrid Robot Arm for Propeller Grinding [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Intelligent Robots and Computer Vision XV: Algorithms, Techniques, Active Vision, and Materials Handling. Boston, 1996, 2904: 517-527.
- [7] 陈维恒. 微分几何[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.

环形差动压磁式非接触动态扭矩传感器的研究与设计

石延平 周庆贵 臧勇
淮海工学院,连云港,222005

摘要:为了提高动态扭矩非接触测量的精度和灵敏度,对一种基于非晶态合金压磁效应的环形差动式扭矩传感器进行了研究。介绍了传感器的结构和原理,推导出了传感器的输出方程。通过试验,分析了这种扭矩传感器探头与轴表面的气隙对输出信号的影响,得出了最佳气隙范围。分别对轴表面附着和不附着非晶态合金层进行了动态转矩测量,对比分析了两种情况下的测量精度和灵敏度。试验显示,采用所设计的传感器,在轴表面附着非晶态合金层时,最大非线性误差为 2.14% (满量程),最大重复性误差为 1.54% (满量程),最大灵敏度为 2.09mV/(N·m)。

关键词:扭矩测量;传感器;非晶态合金;压磁效应

中图分类号:TP212.1 **文章编号:**1004—132X(2011)17—2026—05

Research and Development of a Non-contact Measuring Dynamic Differential Magneto-elastic Effect Torque Sensor with a Supporting Ring

Shi Yanping Zhou Qinggui Zang Yong

Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu, 222005

Abstract: To improve the precision and sensitivity of dynamic torque non-contact measurement, a differential torque sensor based on magneto-elastic effect of the amorphous alloy, and with a supporting ring was discussed. The principles and structure of the sensor were presented, and its output characteristic equation was derived. By experiments, the effects of the gap between the sensor probe and the shaft surface on sensor outputs were analyzed, and the best gap rang was got. A contrast analysis on the measurement accuracy and sensitivity was made in both testing cases of with and without an amorphous alloy thin strips on the shaft surfaces. Experimental results show that maximum no-linear error is 2.14% F·S, maximum repeatability error 1.54% F·S, the maximum sensitivity of 2.09mV/(N·m)。

Key words: torque measurement; sensor; amorphous alloy; magneto-elastic effect

0 引言

如何高精度、不介入、非接触地在线测量传动轴扭矩,一直是扭矩传感器领域的研究重点和难点。基于铁磁材料压磁效应的扭矩传感器,因具有输出功率大、抗干扰能力强、过载性能好、结构简单、使用便捷,并能在恶劣环境下工作以及实现非接触在线测量等优点而受到长期关注^[1]。目

前,研究比较多的是交叉铁芯附加式(又称磁桥式)扭矩传感器,这类传感器虽然结构简单,但由于存在轴的振摆,使传感器探头和轴表面之间的气隙大小发生变化,从而引起磁的分布不均匀,造成测量误差。另外,普通铁磁材料机电耦合系数比较小(通常为 0.15~0.30),压磁效应弱,致使传感器测量精度及灵敏度较低(特别是当载荷较小时)^[2]。

本文研究的扭矩传感器利用非晶态合金的良好软磁特性和较高的机电耦合系数(可达 0.75),并采用多探头和差动结构,能够提高测量精度和

收稿日期:2010—08—02

基金项目:江苏省海洋资源开发研究院科技开放基金资助项目(JSIMR09B07)

[8] 苏高峰,张秋菊.基于UG的叶片数控砂带磨削刀位数据的计算[J].机床与液压,2006(1):61-63.

(编辑 苏卫国)

作者简介:毛磊,男,1987年生。浙江大学现代制造工程研究所硕士研究生。研究方向为机电一体化。发表论文3篇。

何卫,男,1957年生。杭州机床集团有限公司总工程师。周洁,女,1986年生。浙江大学现代制造工程研究所硕士研究生。胡旭晓,男,1965年生。浙江大学现代制造工程研究所副教授。骆广进,男,1971年生。杭州机床集团有限公司首席工程师。周哲平,男,1976年生。杭州机床集团有限公司技术中心副主任。