

圆环刀多点加工自由曲面的刀位算法研究

周 航, 詹建明*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对圆环刀具切触加工自由曲面, 提出了一种新的基于动力学过程的多点切触刀位算法, 该算法主要来自于柔顺自适应刀具吻合曲面的动力学和运动学过程. 从分析圆环曲面的几何性质入手, 结合动力学观点, 分析自适应圆环刀具运动规律. 采用 MATLAB 编写算法程序对自由开模模具曲面多点切触刀位数据进行计算, 并对刀位误差及加工带宽作了简要分析, 最后利用 ADAMS 进行仿真验证, 结果与计算方法吻合.

关键词: 多点切触; 刀位算法; 圆环刀具; 运动学

中图分类号: TG659

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 04-0087-04

五坐标数控技术在自由曲面加工领域得到了广泛的应用, 这些自由曲面主要应用于航空航天、船舶、汽车、模具等行业. 一直以来, 刀位算法都是该领域研究的重点内容, 传统刀位算法属于窄带点接触刀位算法, 加工带宽有限, 加工效率也受到约束. 而以多点切触加工为代表的宽行加工刀位算法是以数值计算作为基础进行刀位计算, 使刀具和工件在宏观区域内能得到较好的匹配, 其获得的加工带宽也比传统算法多 5~10 倍^[1-3].

目前对宽行加工的刀位算法的研究很多, 主要集中在圆环刀多点切触加工曲面的刀位算法上, 研究目的是为了获得更大的加工带宽, 从而提高五坐标数控加工的效率. 但是大多数的刀位算法都是以刀触点为研究对象, 这样因刀具刃形的简化给刀位计算带来误差, 降低了加工精度^[4-6]. 本文正是在此背景下, 以圆环刀运动学入手, 从圆环刀整体上研究多点切触加工曲面的刀位算法, 具有重要的意义.

1 圆环刀具数学方程及性质

圆环刀具是以圆环面为加工刃的刀具, 简称环刀. 其轮廓是由 1 个圆绕其平面内不与其相交的

固定轴旋转而构成的旋转曲面, 该旋转曲面称为回转面, 圆为母线圆, 轴为回转面的回转轴.

若取 z 轴为回转轴, 母线是回转面在 xy 面上的圆, 则其圆环面的参数方程为:

$$\begin{cases} x = (R + r \cos t_1) \cos t_2, \\ y = (R + r \cos t_1) \sin t_2, \\ z = r \sin t_1, \end{cases} \begin{cases} 0 \leq t_1 < 2\pi, \\ 0 \leq t_2 < 2\pi. \end{cases}$$

环刀绕 x 轴转动 θ_x , 再绕 y 轴转动 θ_y , 再平移到向量 $T_0(x_0, y_0, z_0)$, 由矩阵理论知识得圆环曲面的坐标为:

$$\begin{cases} x_q = (R + r \cos t_1) \cos t_2 \cos \theta_y + r \sin t_1 \sin \theta_y + x_0, \\ y_q = (R + r \cos t_1) \cos t_2 \sin \theta_x \sin \theta_y + (R + r \cos t_1) \sin t_2 \cos \theta - r \sin t_1 \sin \theta_x \cos \theta_y + y_0, \\ z_q = -(R + r \cos t_1) \cos t_2 \cos \theta_x \sin \theta_y + (R + r \cos t_1) \sin t_2 \sin \theta_x + r \sin t_1 \cos \theta_x \cos \theta_y + z_0. \end{cases}$$

2 算法原理

设工件曲面为 S_A , 环刀曲面为 S_B , 分别定义在坐标 A 和坐标 B 上, 若 p 为 S_A 上任意一点, q 为 S_B 上的点, 则环刀曲面与工件曲面的有向距离函数可看成是点 p 到曲面 S_B 的距离的最小值. 当

收稿日期: 2013-01-22.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY12E05007); 宁波市重大科技攻关项目 (2012B10057); 浙江省新苗计划项目.

第一作者: 周 航 (1988—), 男, 湖北武汉人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 精密加工. E-mail: zhouhangcandy@163.com

*通信作者: 詹建明 (1974—), 男, 江西余干人, 博士/副教授, 主要研究方向: 柔顺控制理论及精密数控制造. E-mail: zhanjianming@nbu.edu.cn

工件曲面 S_A 与圆环曲面 S_B 点接触时, 两曲面的距离 d_{AB} 为零, 且两曲面接触点间的法矢量 n_p 和 n_q 重合. 又由圆环性质可知, 圆环任意一点的法线与轴线共面, 即是 n_q 与刀轴矢量 n_t 共面, 所以当圆环面与工件曲面在 p 点接触时, 接触力 F_p 与轴线共面, 即刀轴矢量 n_t 和接触点法矢量 n_q 在同一平面 S_p 内.

如图 1 所示, F_p 对环心 O_t 的转矩垂直于 F_p 和 O_t 所在的平面, 即垂直于平面 S_p , 设瞬时转轴为 n_l , 则:

$$n_l = n_p \times n_t. \quad (1)$$

(1) 式表明圆环曲面自适应过程中的瞬时旋转轴由接触点的法向量和刀轴矢量决定.

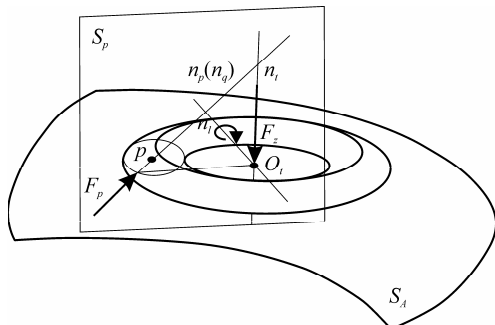


图 1 圆环刀具与工件曲面接触分析

在 z 轴方向重力 F_z 作用下, 圆环刀具曲面竖直向下运动, 直至圆环刀具曲面与工件曲面开始接触. 如图 2(a) 所示, 此时圆环刀具曲面与工件曲面之间将产生接触力 F_p , 显然圆环曲面是中空的对称曲面, 在单个接触力 F_p 和竖直向下 F_z 的作用下, 圆环曲面处于力矩不平衡状态; 假定在整个接触过程中圆环曲面与工件曲面不会脱离, 那么在 F_z 和 F_p 的共同作用下, 圆环刀具曲面将在竖直向下运动的同时绕环心翻转. 如图 2(b) 所示, 当有多点参与接触时, 可使圆环处于力矩平衡状态, 此时环心不再向下运动, 圆环曲面不再翻转, 整个系统

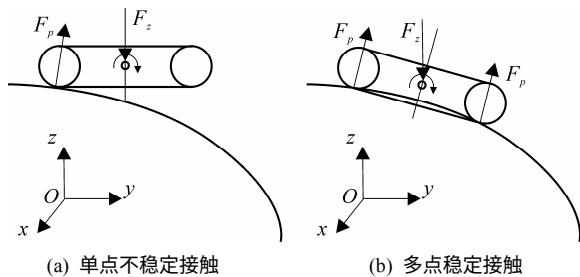


图 2 圆环曲面与工件曲面运动学分析

处于力与力矩平衡状态.

算法首先设定圆环刀具于初始位姿, 求出该姿态下圆环刀与工件曲面的 z 向距离最小的点 p (图 1), 以 p 为虚拟接触点, 保持环心位置 O_t 不变, 将圆环曲面绕 n_l 旋转 θ 角, 计算新姿态下环刀曲面与工件曲面的 z 向最小距离及对应点 p , 重复上述旋转, 记录每次的计算结果, 直到满足循环次数或停止要求时.

3 MATLAB 程序实现

笔者采用 MATLAB 进行刀位算法程序的编写, 根据基于动力学平衡过程的刀位算法原理, 利用 MATLAB 数值计算能力实现这一过程, 具体步骤如下:

(1) 根据工件曲面的 $S_A(u, v)$ 和圆环刀具曲面的 $S_B(t_1, t_2)$ 进行建模.

(2) 旋转角度 θ , 允许最小加工带宽 $w_{\min}$.

(3) 计算姿态矩阵, 记为 N^i .

(4) 按(1)式计算瞬时旋转轴.

(5) 计算圆环曲面各采样点到工件曲面的距离, 记为 $d^i(t_1, t_2)$, 找出其最小值, 记为 $d_{\min}^i$, 找出对应于 $d_{\min}^i$ 工件曲面的点记为 p^i .

(6) 判断 $d_{\min}^i > d_{\min}^{i-1}$, 如果“是”, 则令 $N^{i-1} = N^i$, 并转入步骤(8); 如果“否”, 则继续下个步骤.

(7) 计算绕瞬时旋转轴旋转 θ 角的变换矩阵, 记为 R^i , 则 $N^{i+1} = R^i \times N^i$, 并转至步骤(5).

(8) 判断工件上的点位信息是否大于最小加工带宽 $w_{\min}$, 如果“是”, 则记录 p^i 和 $d_{\min}^i$, 并转至步骤(9); 如果“否”则转至步骤(7).

(9) 程序结束, 输出结果.

4 圆环刀切触加工曲面刀位数据计算实例

为验证基于运动学过程刀位算法正确性和有效性, 以自由开阔曲面进行计算, 并利用 ADAMS 软件进行验证.

实际算例中, 设置最小允许加工带宽 $w_{\min} = 0.05 \text{ mm}$, 旋转角度 $\theta = 0.01 \text{ rad}$. 选取圆环参数 $R = 2.5 \text{ cm}$, $r = 0.5 \text{ cm}$, 将圆环按经纬圆离散成 40000 个采样点, 在 MATLAB 建立圆环曲面模型. 选取在模具行业中常使用的一种开阔的自由曲面作为计算实例(图 3), 其参数方程为:

$$\begin{cases} x = -94.4 + 88.9v + 5.6v^2, \\ y = -131.3u + 28.1u^2, \\ z = 5.9(u^2v^2 + u^2v) - 3.9uv^2 + 76.2u^2 + 6.7v^2 - \\ \quad 27.3uv - 50.8u + 25.0v + 12.1, \end{cases}$$

其中, $u \in [0, 1], v \in [0, 1]$.

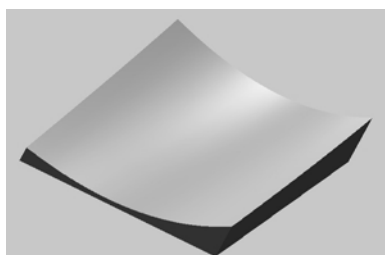


图3 自由开模模具曲面

采用等 v 参数线作为计算轨迹线. 部分刀位数据见表 1, 其中, O_t 代表刀心位置, n_t 代表刀轴矢量, 选取 $v = 0.5$.

表1 部分刀位数据

O_t / cm				n_t		
u	x	y	z	x	y	z
0.1	-48.5	-12.84	21.12	-0.272	-0.352	0.8951
0.2	-48.5	-25.13	16.98	-0.255	-0.258	0.9314
0.3	-48.5	-36.86	14.46	-0.238	-0.143	0.9605
0.4	-48.5	-48.02	13.56	-0.218	-0.008	0.9759
0.5	-48.5	-58.62	14.28	-0.195	0.1441	0.9700
0.6	-48.5	-68.66	16.63	-0.170	0.3038	0.9373
0.7	-48.5	-78.14	20.61	-0.144	0.4573	0.8774
0.8	-48.5	-87.05	26.21	-0.120	0.5929	0.7962
0.9	-48.5	-95.40	33.46	-0.097	0.7035	0.7039
1.0	-48.5	-103.2	42.34	-0.079	0.7885	0.6098

图4是代表性的瞬时刀位误差分布曲线, 可见误差为零的点均有2个, 说明所编写的算法程序能应用于圆环刀具多点切触加工自由模具凹曲面的刀位计算中. 图中没有误差小于零的点, 说明瞬时刀位下圆环刀具与工件曲面未发生局部过切. 误差曲线分布都呈多点切触加工特有的 w 型.

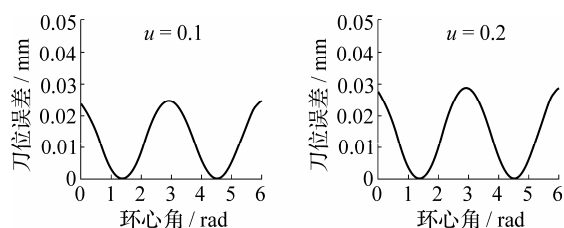


图4 等 v 参数线刀位误差分布曲线

图5显示了在 $u = 0.5, v = 0.5$ 处, 环刀环心圆半径 R 对加工误差的影响.

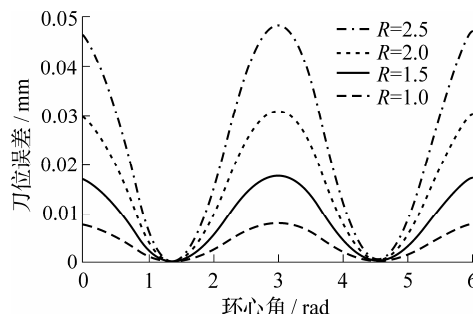


图5 环刀参数对刀位误差的影响

为验证程序的有效性及其计算结果的正确性, 如图6所示, 笔者设计了一款具有自适应功能的圆环刀具系统, 用 ADAMS 进行仿真求解, 并将结果与 MATLAB 程序计算结果进行比较.

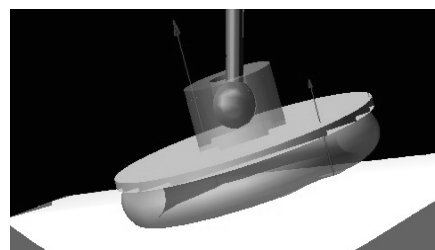
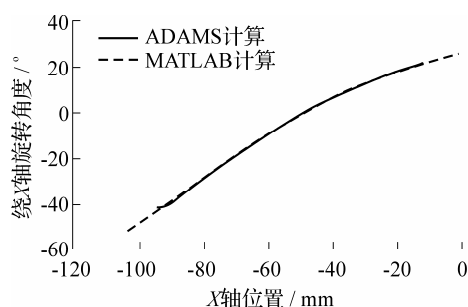
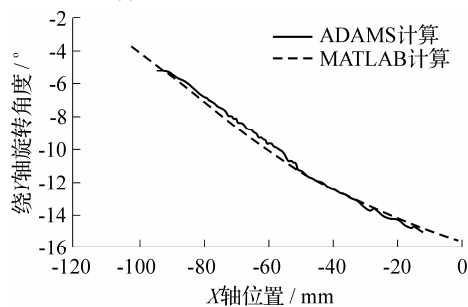


图6 ADAMS 圆环面与曲面多点接触图

选取 $v = 0.5$ 方向作为轨迹方向, 分别测量绕 x 轴和 y 轴的旋转角以及环心 z 坐标值, 并将测量曲线与 MATLAB 计算结果进行比较(图7).



(a) 绕 X 轴旋转角结果比较



(b) 绕 Y 轴旋转角结果比较

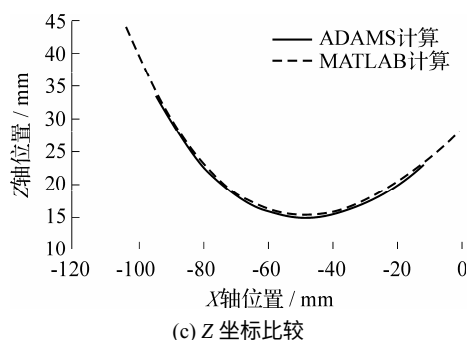


图7 MATLAB计算结果与ADAMS仿真结果比较

从图7可见, MATLAB计算结果与ADAMS计算结果非常接近。

5 结论

通过对圆环刀具和自由曲面的建模, 分析其运动学过程, 确定程序算法。编写 MATLAB 程序, 以一种自由开阔曲面为算例进行计算, 结果表明圆环刀与自由曲面未发生局部过切。误差曲线的分布呈多点切触加工特有的w型。利用ADAMS软件进行计算仿真, 验证了程序的准确性和可靠性。

致谢 感谢张建波、吕必达、于四海、应仙根等学长给予的帮助和贡献。

参考文献:

- [1] Warkentin A, Ismail F, Bedi S. Comparison between multipoint and other 5-axis tool position strategies[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(2):185-208.
- [2] 袁哲俊, 刘雄伟, 刘华明. 五坐标端铣数控加工计算理论分析[J]. 机械工程学报, 1991, 29(1):31-37.
- [3] 王丹, 徐汝锋, 陈五一. 基于UG二次开发的宽行加工算法实现[J]. 机床与液压, 2008, 36(1):32-34.
- [4] 李志强. 曲面的宽行数控加工理论研究及其在大型抛物面天线加工中的应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
- [5] 倪炎榕, 马登哲, 张洪, 等. 圆环面刀具五坐标数控加工复杂曲面优化刀位算法[J]. 机械工程学报, 2001, 37(2):87-91.
- [6] 吕雪丽, 张洪. 广域曲率吻合原则与复杂曲面数控加工的全面优化[J]. 机械设计与制造, 2003(5):94-96.
- [7] 李增刚. ADAMS入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

Positioning Algorithm of Ringlike Cutter Multi-point Contact Machining

ZHOU Hang, ZHAN Jian-ming*

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A new tool positioning algorithm of toroidal cutter multi-point contact for processing curvic surface is proposed. The principle of the algorithms is originated from the dynamics and kinematics related in the processing. Based on the analysis of the geometry property of torus and the character of self-adaptive tool system, the tool positioning algorithm model is established. A self-adaptive toroidal tool system is designed, and a dynamics process in ADAMS is simulated to process the positioning data. The results are compared between using ADAMS and MATLAB and the algorithm program correctness and effectiveness are verified, the results coincide with the calculation method.

Key words: multi-point machining; tool position algorithm; toroidal tool; kinematics equilibrium

(责任编辑 章践立)