

环形刀高度变化刀路轨迹规划方法

张安山, 刘献礼, 李茂月, 张 麒, 郭佳鑫

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 为提高汽车覆盖件模具加工效率, 将环形刀应用于汽车模具小曲率面的半精及精加工过程. 通过对三坐标铣削小曲率面的刀具切触几何分析, 确定环形刀最佳进给方向应沿工件高度变化方向, 此时可使有效切削带宽达到最大. 基于此结论, 分别对两类特殊型面进行了刀路轨迹规划. 对于单一方向曲率变化面采用垂直截面法, 截面方向沿最大主曲率方向, 实验表明: 垂直截面法与等高线法相比可提高加工效率 25%, 并且有较好的表面质量; 对于圆鼓面采用放射精加工方法, 仿真结果表明: 此方法与三维偏置方法相比可提高加工效率 22.64%, 并且避免了周边欠切.

关键词: 汽车模具; 环形刀; 有效切削带宽; 高度变化; 刀路轨迹规划

中图分类号: TG506 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)05-0043-07

The Tool Path Planning Method of Height Changing for Torus Cutter

ZHANG An-shan, LIU Xian-li, LI Mao-yue, ZHANG Qi, GUO Jia-xin

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to improve the processing efficiency of automotive covering molds, the torus cutters are used in the process of semi-finishing and finishing of small curvature surface. Through the tool contact geometric analysis of 3-axis machining small-curvature surface, it determines that the optimal cutter feed direction is along the direction of the workpiece height changing, which can maximize effective cutting interval. Based on the conclusion, tool path planning is done for two kinds of special surface. Vertical section method is used for the single-direction-curvature changing surface, and the section is along the direction of maximum principal curvature. The experiment shows that the vertical section method can improve the machining efficiency by 25%, compared with the contour method, and good surface quality is generated. Radiation finish machining method is adopted on the round-drum surface, the simulation result shows that this method can improve the machining efficiency by 22.64%, compared with the three-dimensional offset method, and can avoid the surrounding over cut.

Key words: Automotive covering molds; Torus cutter; Effective cutting interval; Height changing; Tool path planning

0 引 言

国内汽车制造商为适应市场需求, 频繁更新车型, 汽车换型时约 80% 以上覆盖件模具需要更换.

汽车覆盖件模具材料多为 Cr12MoV 和 7CrSiMnMoV 等模具钢, 淬火后硬度达到 HRC50-65, 属于典型高强度、高硬度材料^[1]. 目前针对汽车覆盖件模具的加工大多使用 3 轴或者 3+2 轴数控机床^[2], 使用的刀具多为球头刀. 然而其中常存在大面积的平坦

收稿日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51235003).

作者简介: 张安山(1987—), 男, 硕士研究生, E-mail: zhanganshan123@126.com;

刘献礼(1961—), 男, 教授, 博士研究生导师;

李茂月(1981—), 男, 博士, 讲师.

类小曲率曲面,如图1所示为汽车前车盖模具,为典型的小曲率特征模具型面。

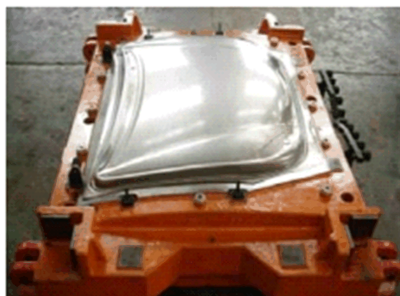


图1 图1小曲率型面

针对这种平坦小曲率面,球头刀存在端铣性能差、加工带宽窄,切削速度较低等问题^[3],而且在加工表面往往会形成毛刺,如图2所示,限制了汽车覆盖件模具的加工效率和质量。

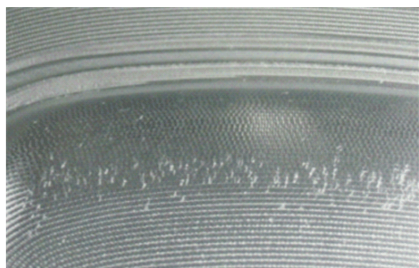


图2 球头刀加工表面产生的毛刺

刀具路径规划是数控加工编程的基础和关键,其好坏直接影响加工表面质量数控设备的使用效率。近年来研究人员对此也展开了大量研究,常用的主要方法有以下几种:等参数线法^[4],刀具轨迹是由参数曲面的一个参数保持不变,而另一个参数有规律地变化来生成的。该方法的优点是计算简单,计算速度快,但对于组合曲面,由于每张子曲面的参数线可能不一致,要使整张组合曲面的刀具轨迹一致是很困难的;截面线法^[5-7]是指采用一组平行平面或曲面与被加工曲面求交,截得一组交线,刀具与被加工曲面的接触点位于这组交线上,该方法特别适合于加工参数化不均匀的曲面和拓扑关系复杂的组合曲面,对裁剪曲面处理起来较为简单,算法效率高,可靠性也很好;等残留高度法^[8]是首先选择一条初始轨迹,将初始路径按照精度要求离散得到刀触点,以相邻两轨迹间的残留高度不变为前提,根据刀具半径和曲面曲率计算每一刀触点对应的下一刀触点,再拟合得到下一条刀具轨迹;此方法目前也仅在球头刀加工中广泛应用,而在环形刀三坐标加工

中,由于几何切触关系复杂,实现较为困难;空间填充曲线^[9]作为生成刀具轨迹的方法,由于在参数区间上分布均匀,连续性较好,基本上消除了切削过程中的空行程,降低了刀具轨迹的总长度,但切削方向的频繁变化会影响了表面质量。总之,由于切触几何关系的复杂性,针对三轴环形刀的刀路轨迹规划,应尽量使用较为简单的刀路轨迹生成方法,否则会造成加工路径的无规则性,极易发生过切,甚至造成干涉碰撞,损坏刀具。

本文结合环形刀三轴加工刀具切触情况,分析刀具进给方向对有效切削带宽的影响,确定刀具沿工件高度变化方向走刀可使有效切削带宽达到最大。因此,提出针对两类特殊型面的基于高度变化的刀路轨迹生成方法。

1 环形刀几何模型描述

环形刀是在刀具侧面和端面之间以圆弧过渡的一种刀具,其工艺特点和平底刀类似^[10]。对于小曲率面的加工,环形刀与球头刀相比是典型的宽行加工刀具,有刚性强、切削条件良好、金属去除速率高等优点,可缓解加工过程中颤振及刀具磨损,切削条件要优于球头刀。环形刀的简化模型及其数学描述如图3所示,可以看出其是由半径为 r 的中空平底和半径为 r_f 的刀片圆角组成。其有效切削刃为 r_f 刀片高速旋转后形成的圆环面 Σ 。

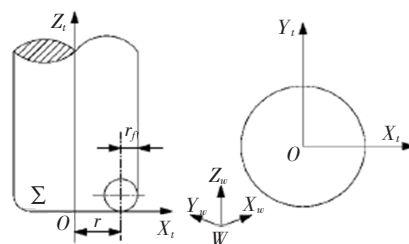


图3 环形刀简化数学模型

环形刀圆环面的切削刃曲率可以在很大范围内变化^[11],圆环面 Σ 刀触点处的最大和最小主曲率分别用 $k_{\max}$ 与 $k_{\min}$ 表示,其具体表达式见式(1)、式(2),其中 α 为被加工曲面坡度。

$$k_{\max} = \frac{1}{r_f} \quad (1)$$

$$k_{\min} = \frac{\sin \alpha}{r + r_f \sin \alpha} \quad (2)$$

环形刀圆环面切削刃 Σ 的最大主曲率与最小主曲率方向如图4所示,其中圆环面最小主曲率方向

沿其刀触点处的横截圆的切线方向,并处在 $X_t Y_t$ 平面内;最大主曲率方向沿刀触点处圆环面的纵切方向,其与 r_f 圆角相切。

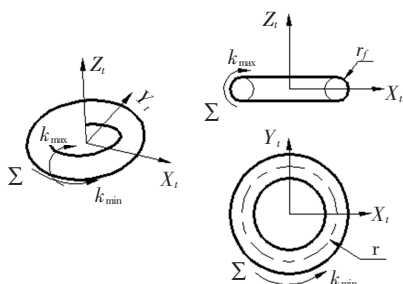


图4 环形刀有效切削刃

2 刀具切触几何模型分析

2.1 环形刀加工局部坐标系的建立

分析环形刀在切削过程中有效切削刃 Σ 与设计曲面 S 之间的切触模型,在切触点 P 处建立设计曲面 S 的切平面 T 上的局部坐标系,如图5所示。

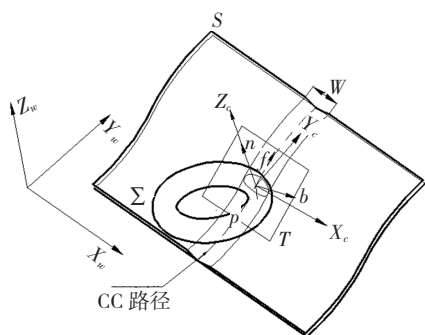


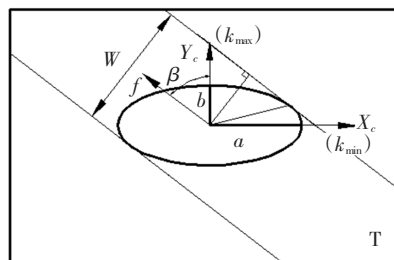
图5 环形刀加工局部坐标系的建立

图中 f 为刀具进给方向, n 曲面的切触点法矢,取 $b = f \times n$, 则 b 为行进给方向向量,刀具刀触点的最大最小主曲率方向分别为 $k_{\max}$ 、 $k_{\min}$, 以 $k_{\min}$ 、 $k_{\max}$ 、 n 所在方向建立局部坐标系 $PX_c Y_c Z_c$. 令 f 与刀触点处圆环面 Σ 最大主曲率 $k_{\max}$ 方向之间的夹角为 β . X_c 、 Y_c 轴均在切平面 T 内. 刀具单次独立走刀在工件表面留下的切削痕迹的宽度定义为有效切削带宽 W . 在固定切深情况下,有效切削带宽 W 越宽,刀具加工效率越高。

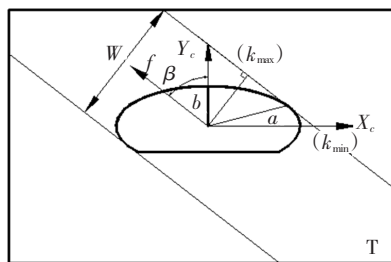
2.2 刀具进给方向对有效切削带宽的影响

为分析刀具进给方向对有效切削带宽的影响,将刀具圆环面切入工件部分向刀具所在切平面 T 内投影. 本文对有效切削带宽度切触模型做了简化

处理,当仅圆角部分参与切削时,切平面 T 内的投影近似看成椭圆形;当圆角与平底区域均参与切削时,切平面 T 内的投影近似看成部分椭圆形,如图6所示. 椭圆的最大最小极径方向分别代表了刀具圆环面 Σ 的最小最大曲率方向,其中进给方向 f 与 $k_{\max}$ 方向之间夹角为 β .



(a) 投影呈椭圆



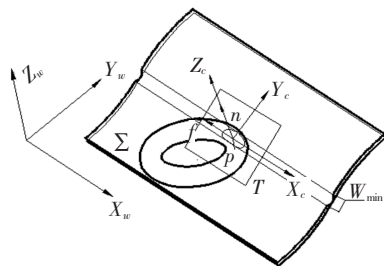
(b) 投影呈部分椭圆

图6 切平面内切触模型投影图

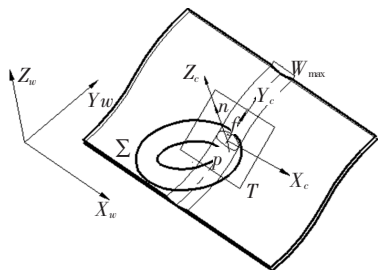
由椭圆性质可知,当刀具进给方向沿 Y_c 轴方向(即刀具最大主曲率 $k_{\max}$ 方向)时,此时 $\beta = 0$,刀具有效切削带宽可达到最大;而刀具进给方向沿 X_c 轴方向进给时(刀具的最小主曲率 $k_{\min}$ 方向),此时 $\beta = \pm \pi/2$,刀具的有效切削带宽达到最小。

在三轴加工中,如果环形刀沿其最小主曲率方向进刀,由于最小主曲率方向始终在 $X_t Y_t$ 平面内,此时的走刀方向在高度上不产生变化,既是等高线走刀方式. 而环形刀沿其最大主曲率方向进刀时,其走刀方向垂直于等高线方向,此时的走刀方向沿工件高度变化方向. 环形刀等高线走刀方法与沿工件高度变化方向走刀方法有效切削带宽对比图,如图7中(a)、(b)所示。

从图中可看出沿高度变化方向走刀的有效切削带宽明显优于等高线走刀方式. 因此本文提出了沿工件高度变化方向的环形刀刀路轨迹规划方法。



(a) 环形刀等高线走刀方法图



(b) 环形刀高度变化走刀方法

图7 有效切削带宽对比

3 基于高度变化的刀路轨迹规划应用举例

本文所研究的曲面均为小曲率曲面,符合式(3)条件,式中 $K_{\max}$ 、 $K_{\min}$ 分别为被加工曲面的任意一点最大和最小主曲率,即满足刀具的刀触点处的曲率远远大于被加工曲面的曲率。

$$k_{\max} > k_{\min} \gg K_{\max} > K_{\min} \quad (3)$$

在具体刀路轨迹规划时,根据环形刀沿工件高度变化走刀原则,应尽量使刀具路径沿工件高度变化方向,本文给出了两类特定型面的刀路轨迹规划方法。选取型面最高点,即被加工曲面 Z 高度值最大的点,作为参考的对象,由主曲率定义可知,在最高点处存在最大及最小主曲率方向,由最主曲率将型面分为两类,第一类是 $K_{\min} \approx 0$,而 $K_{\max}$ 与 $K_{\min}$ 相差较大,称这种曲面为单一方向曲率变化面;第二类是 $K_{\max} \approx K_{\min}$,曲率在各个方向变化不大,称这种曲面为圆鼓面。

3.1 单一方向曲率变化面刀路轨迹规划

针对单一方向曲率变化面,在型面定位时,应尽量使 $K_{\max}$ 方向沿高度变化方向,而 $K_{\min}$ 方向处于接近水平位置,此时加工效率最高。在规划刀路时,可采用垂直截面法,截面方向沿最大主曲率方向,通过截面组与设计曲面求交,可生成的沿 $K_{\max}$ 方向刀触点路径,如图8所示。然后由刀触点反算刀位点,得到最终的刀具路径。

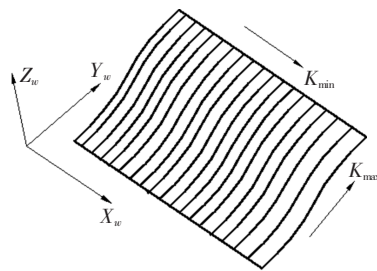


图8 单一方向曲率变化面刀触点路径

此类曲面中存在凹曲面情况,环形刀虽然加工效率较高,但平底特性使其在三轴加工平坦类凹曲面过程中会发生曲率干涉,导致欠切,如图9所示。

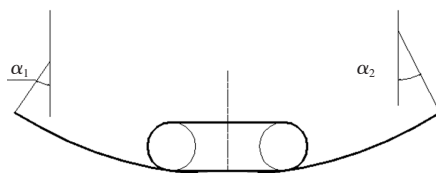


图9 刀具平底特性产生曲率干涉

为解决此类小曲率凹曲面的加工问题,本文使用3+2轴机床将型面固定于某一倾斜角度,来防止曲率干涉,如图10所示。

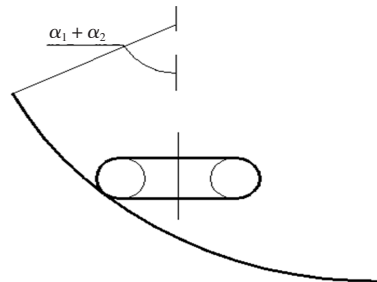


图10 凹曲面倾斜装夹方式

凹曲面重新定位后,应满足曲面的法线方向指向同一侧,并且要保证重新定位后的曲面最大坡度小于 90° 。图中凹曲面两侧最大的曲面坡度分别为 α_1 、 α_2 ;重新定位后使一侧坡度为 0 ,另一侧最大坡度为 $\alpha_1 + \alpha_2 < 90^\circ$ 。

在 Powermill 实际应用中,截面法具体应用于平行精加工策略,输入特定角度即可改变截面的方向,使刀具沿需要的方向进给。但 Powermill 精加工策略生成的精加工刀具路径的刀位点默认处于型面以内,这会造成斜坡面下方边缘位置欠切,如图11所示。

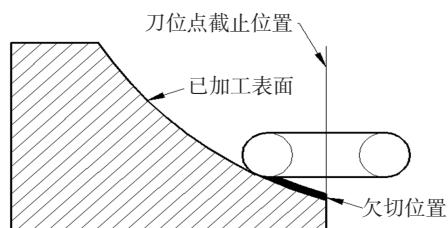


图 11 Powermill 精加工策略造成欠切

在使用沿工件高度变化方向走刀方式时,将刀具路径的切入切出方式设为延伸移动,移动距离为刀具平底半径,此时可有效地解决欠切问题,如图 12 所示. 而使用等高线走刀方式时,路径延伸并不能解决此问题.

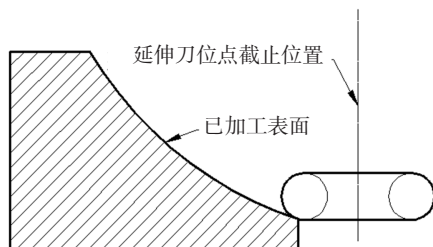


图 12 延伸后切削效果

为了对单方向曲率变化面的刀路轨迹规划方法进行验证,在三轴机床上进行单方向曲率变化面对比加工实验. 图 13 为粗加工之后的 45 号钢实验样件.



图 13 粗加工后单方向曲率变化面

实验将型面精加工分成 3 部分: 左侧为直径 12 mm 球头刀(B12) 等高线走刀加工区域,行距为 0.15 mm; 中间为直径 12 mm、圆角半径为 3 mm 的环形刀(D12R3) 高度变化方向走刀加工区域,行距为 0.2 mm; 右侧为 D12R3 环形刀等高线走刀加工区域,行距为 0.15 mm. 三个区域的加工时间分别约: 20 min、15 min、20 min, 精加工后的型面如图 14 所示.

由图 15 可以看出,环形刀沿高度变化方向走刀

区域下方边缘无欠切,加工表面质量较好; 其中右侧环形刀等高线加工区域与左侧球头刀等高线加工区域都有不同程度欠切现象.

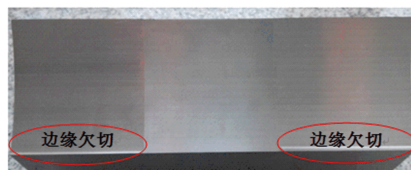
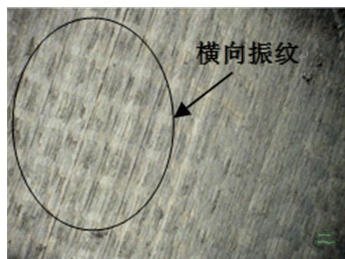


图 14 分区域进行精加工后的型面

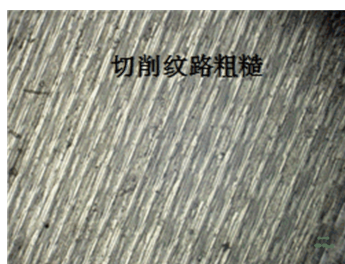
为了明显看出 3 个表面的质量差别,在超景深显微镜下,拍摄曲面表面的形貌,如图 15 所示,其中 (a)、(b)、(c) 分别对应了精加工表面的左、中、右区域.



(a) 球头刀等高线加工



(b) 环形刀高度变化加工



(c) 环形刀等高线加工

图 15 超景深显微镜下拍摄的表面形貌

从图中对比可以看出: 图 15(a) 中球头刀等高线加工虽然采用较小行距,但依然存在因端部切削振动造成的横向振纹; 图 15(b) 中环形刀高度变化方向走刀方法,采用了较大行距,仍可保持平稳切削,表面无振纹,纹路平整,提高了加工效率. 图 15(c) 中环形刀等高线加工区域因窄行加工造成切削纹路粗糙,表面质量较差; 可见环形刀沿高度变化方

向走刀的优势.

3.2 圆鼓类曲面刀路轨迹规划

针对第二类特征的圆鼓面,常用的加工策略为三维偏置加工,按照零件周边形状向中心偏置走刀,这种加工方法也存在带宽窄、效率低的问题.因此,为保证加工效率,刀具路径仍然应该遵循沿高度变化方向走刀原则,如图16所示,从图中可以看出,此时刀具路径沿型面呈放射状,刀具路径相交于曲面最高点,但放射状路径周边存在间隔过宽的问题,会影响表面质量.

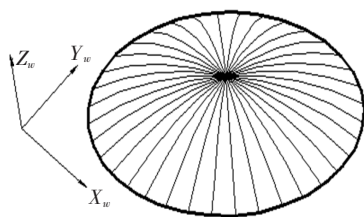


图16 圆鼓面的放射精加工路径

本文提出了将圆鼓面分成多个围绕最高点中心的圆环区域,圆环区域之间存在重合区,如图17所示,对每个圆环区域使用单独行距的放射精加工方法,行距由内向外依次减小,以此来解决大曲面单次放射精加工周边路径间隔过宽的问题.同时,刀具切入切出方式依然采用路径延伸方式,来防止边缘欠切现象.

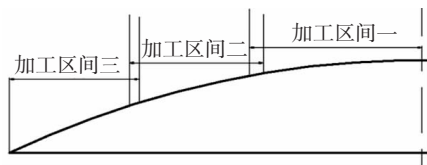


图17 圆鼓面多区间区域划分

放射精加工策略已在 Powermill 软件中实现,本文应用 Powermill 对直径为 400 mm 的圆鼓面分别使用三维偏置策略与多区域放射精加工策略进行编程对比,使用的刀具都为直径为 30 mm 圆角半径为 3 mm 的环形刀.三维偏置方法按照周边参考线由外向内加工,行距为 2.5 mm,生成的刀具路径如图18所示.

放射精加工策略将型面加工分成三部分:第一部分为直径 101 mm 的圆,行距为 3.5 mm;第二部分为外径 100 ~ 151 mm 的圆环,行距设为 2 mm;第三部分为 150 ~ 200 mm 的圆环,行距为 1 mm.生成的刀具路径如图19所示.

三维偏置策略产生的刀具路径总长约 52 887 mm,

加工估计时间 53 min;多区域放射精加工路径总长约 41 272 mm,加工估计时间 41 min.加工仿真效果对比如图20所示.

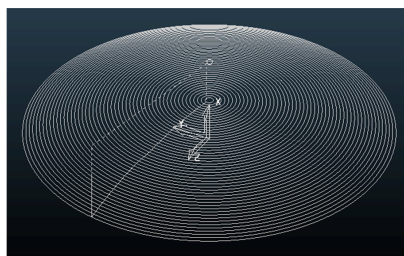


图18 三维偏置加工刀具路径

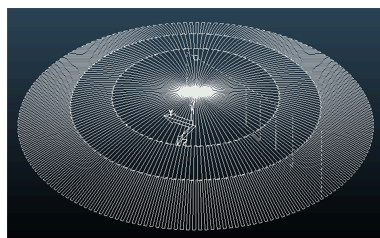
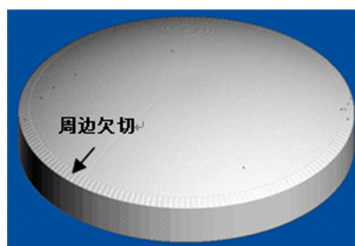
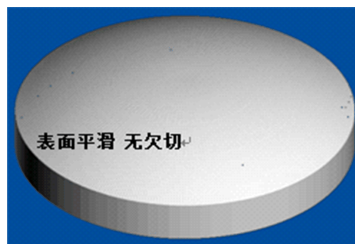


图19 多区域放射精加工刀具路径



(a)三维偏置加工仿真图



(b)多区域放射精加工策略

图20 Powermill 加工仿真效果对比

仿真结果表明:多区域放射精加工方法与三维偏置加工方法相比,有较好加工效果,表面无欠切现象.

4 结 论

1) 几何分析表明,环形刀三坐标加工小曲率面时,当沿高度变化方向走刀时,有效切削带宽达到最大,而沿等高线方向走刀时有效切削带宽达到最小,

这为环形刀三轴加工刀路轨迹规划提供了基本依据;

2) 针对单一方向曲率变化面刀路轨迹规划采用垂直截面法,截面沿最最大主曲率方向,刀路轨迹沿高度变化方向. 实验表明: 高度变化方向走刀方法与等高线走刀方法相比可提高加工效率 25%, 同时有较好的表面质量;

3) 针对圆鼓面采用多区域放射精加工策略,仿真结果表明: 多区域放射精加工策略与普通三维偏置策略相比,加工效率可提高 22.64%, 同时有更好的加工表面质量,周边无欠切现象.

参 考 文 献:

- [1] ALTAN T, LILLY B, Yen Y C. Manufacturing of Dies and Molds [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2001, 50 (2): 405 - 423.
- [2] CHOI B K, KIM D H, Jerard R B. C-space Approach to Tool Path Generation For Die and Mold Machining [J]. Computer Aided Design, 1997, 29 (9): 657 - 669.
- [3] 张安山, 刘献礼, 李茂月, 等. 汽车覆盖件模具的非球头刀宽行

加工方法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19 (1): 7 - 13.

- [4] MASOOD S H, BAGAM V K, CHANTANBUBPHA P A. Computerized Minimum Distance Algorithm For Machining of Sculptured Surfaces [J]. Computer Aided Design, 2002, 42: 291 - 297.
- [5] CHOI B K, LEE C S, HWANG J S, et al. Compound Surface Modeling and Machining [J]. Computer Aided Design, 1988, 20 (3): 127 - 136.
- [6] HUANG Y, OLIVER J H. Non - constant Parameter NC Tool Path Generation on Sculptured Surfaces [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1994, 9 (5): 281 - 290.
- [7] SURESH K, YANG D C H. Constant Scallop-height Machining of Free-form Surfaces [J]. Journal of Engineering for Industry, 1994, 116 (2): 253 - 259.
- [8] JORDAN J, YASUKO T, FERGUSON H R P, et al. Space filling Curves in Tool path Applications [J]. Computer Aided Design, 1994, 26 (3): 215 - 224.
- [9] 陈良骥, 程俊伟, 王永章, 等. 环形刀五轴数控加工刀具路径生成算法 [J]. 机械工程学报, 2008, 44 (3): 205 - 212.
- [10] 张莹, 张定华, 吴宝海, 等. 复杂曲面环形刀五轴加工的自适应刀轴矢量优化方法 [J]. 中国机械工程, 2008, 19 (8): 945 - 948.

(编辑: 关 毅)

(上接第 42 页)

质量降低. 特别是增加了一些奇异顶点(度数不等于 4 的顶点), 对奇异点的误差和精度分析是细分的难点, 目前尚未解决, 我们将对此作进一步的研究探讨.

参 考 文 献:

- [1] 王仁宏, 李崇君, 朱春钢. 计算几何教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 333 - 337.
- [2] 林兴, 罗国明, 张纪文. 基于 C-B 样条的 C-C 细分曲面 [J]. 中国图像图形学报, 2002, 7 (9): 876 - 882.

- [3] 曾庭俊, 罗国明, 张纪文, 等. C-C 细分曲面的形状调整 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16 (5): 707 - 713.
- [4] 胡和平, 蒋洪波, 李娟. 自适应 C-C 细分算法 [J]. 华中科技大学学报, 2002, 30 (10): 56 - 60.
- [5] 戴晨光, 王敏杰. 基于 Catwull-Clark 模式自适应细分技术研究 [J]. 大连: 大连理工大学学报, 2007: 10 - 20.
- [6] 郑津津, 朱巍, 周洪军. 非平均化自适应 C-C 细分算法 [J]. 计算机应用与软件, 2010, 27 (1): 6 - 10.

(编辑: 温泽宇)