

1-4-2019

Method and Simulation of Gradual Rough Milling Based on Surface Deformation

Xiulin Sui

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

Xiaoqi Chen

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

Jianghua Ge

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

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Method and Simulation of Gradual Rough Milling Based on Surface Deformation

Abstract

Abstract: In view of uneven allowance and rough surface of traditional equal height stratification for rough milling, a gradual hierarchy process method was proposed. *As the model established by T-spline surface has unified parameter domain, an improved variable distance offset method was used to define the rules of surface deformation, and a series of deformation surface sequences were obtained. The cutting depth, tool radius and other machining parameters were used as constraint conditions so as to get the sequence of processing layers. By planning the tool path of each layer, the whole tool path of gradual hierarchy process which was based on the surface deformation was obtained.* Based on VS2010 and Open GL, a simulation module was developed to verify the simulation, and the methods were checked by the actual machining. The results show that the machining allowance is more uniform and the surface is smoother.

Keywords

surface deformation, gradual hierarchy process, T-spline surface, tool path, simulation

Recommended Citation

Sui Xiulin, Chen Xiaoqi, Ge Jianghua. Method and Simulation of Gradual Rough Milling Based on Surface Deformation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1399-1405.

基于曲面变形的渐进型粗铣方法及仿真研究

隋秀凜, 陈晓奇, 葛江华

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 针对传统粗铣等高度分层加工方法存在加工余量不均匀、成形表面粗糙等缺点, 提出一种渐进型分层加工方法。利用T样条曲面建模具有统一参数域的特点, 对变距离偏置法进行改进, 确定T样条曲面的曲面变形规律, 得到一系列的变形曲面序列。将切削深度、刀具半径等加工参数作为约束条件, 得到加工分层曲面序列。规划各分层曲面内刀具路径, 得到整个基于曲面变形的渐进型分层加工刀具路径。采用VS2010和OpenGL开发出的仿真模块进行仿真验证, 通过实际加工进行检验。实验结果表明, 该方法加工余量更均匀、成形表面更光滑。

关键词: 曲面变形; 渐进型加工; T样条曲面; 刀具路径; 仿真

中图分类号: TP391.73 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2018)04-1399-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804023

Method and Simulation of Gradual Rough Milling Based on Surface Deformation

Sui Xiulin, Chen Xiaoqi, Ge Jianghua

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

Abstract: In view of uneven allowance and rough surface of traditional equal height stratification for rough milling, a gradual hierarchy process method was proposed. As the model established by T-spline surface has unified parameter domain, an improved variable distance offset method was used to define the rules of surface deformation, and a series of deformation surface sequences were obtained. The cutting depth, tool radius and other machining parameters were used as constraint conditions so as to get the sequence of processing layers. By planning the tool path of each layer, the whole tool path of gradual hierarchy process which was based on the surface deformation was obtained. Based on VS2010 and Open GL, a simulation module was developed to verify the simulation, and the methods were checked by the actual machining. The results show that the machining allowance is more uniform and the surface is smoother.

Keywords: surface deformation; gradual hierarchy process; T-spline surface; tool path; simulation

引言

在传统的粗铣加工中, 为了简化刀具路径规划和工艺流程, 一般使用等高度法分层加工^[1]。虽然

该方法流程简单, 易于实现, 但是加工之后将会留下粗糙的残留材料。残余材料呈锯齿状, 在工件表面不均匀分布, 严重影响精加工成形质量。并且不均匀的切削量会造成切削力突变, 使刀具剧烈颤振, 损害机床进给系统。有学者为了改进传统等高度分层加工, 提出非均匀分层方法。综合考虑工件形状、毛坯形状和切削深度, 自适应地安排各个加工层之间的距离。但是该方法本质上仍然使用平



收稿日期: 2016-05-03 修回日期: 2016-10-17;
基金项目: 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金
(2013RFXXJ064);
作者简介: 隋秀凜(1962-), 女, 山东龙口, 博士,
教授, 研究方向为计算机集成制造技术、虚拟制造
技术、数控技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 1399 •

行平面作为加工面, 无法避免上述等高度分层法的缺陷。

在粗铣构建工件模型时, 一般采用多面体模型和张量积曲面模型来建模, 因此需要面片的裁剪和拼接。而基于 T 样条曲面建立的模型不需要面片的划分和拼接, 全曲面使用单一参数域表示, 具有稳定的拓扑数据结构^[2-3]。因此本文提出了一种基于曲面变形的渐进型分层粗铣加工方法, 该方法应用改进的变距离偏置法确定 T 样条曲面的变形规律。然后将加工参数设定为变形的约束条件, 使毛坯曲面逐渐向工件曲面变形, 求得渐进型加工的分层曲面序列, 规划各分层内刀具路径, 最终得到整个分层加工的刀具路径。

1 改进的变距离偏置法的 T 样条曲面变形规划

1.1 改进的变距离偏置方法

根据文献[4-7]提出的变距离偏置的原理和思想, 结合文献[2-3]T 样条曲面建模的特点以及 T 网格的特殊结构, 提出一种改进的变距离偏置方法。由于变形的目标曲面和源曲面都是 T 样条曲面, 所以两者控制的 T 网格具有相同的拓扑结构, 具有的参数域原像也相同。分层曲面的不同点就是控制顶点的位置的不同, 因此, 通过控制各个控制顶点的位置变动, 就可以得到合理的分层曲面。

基于该原理, 本文将毛坯形状定义为源曲面, 将工件曲面定义为目标曲面。使控制顶点从源曲面向目标曲面进行线性位移, 即可得到变形曲面序列。设定目标曲面为 S_n , 源曲面为 S_0 , 变形前控制顶点集合为 $P=[P_1, P_2, P_3 \dots P_m]^T$, 变形后的控制顶点集合为 $\tilde{P}=[\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \tilde{P}_3 \dots \tilde{P}_m]^T$, 控制顶点的变形矢量为 $e=[e_1, e_2, e_3 \dots e_m]^T$, T 样条曲面的矩阵形式定义为: $S=R^T P$, 因此可得变形后的曲面为:

$$\tilde{S}=R^T \tilde{P}=R^T (P+e) \quad (1)$$

利用该定义, 本文构造一个改进的变距离偏置方法的曲面动态进化模型。设定目标曲面为 S_n 上的

控制顶点集合为 $P_n=[P_{n_1}, P_{n_2}, P_{n_3} \dots P_{n_m}]^T$, 源曲面 S_0 上的控制顶点集合为 $P_0=[P_{0_1}, P_{0_2}, P_{0_3} \dots P_{0_m}]^T$ 。因为目标曲面 S_n 和源曲面 S_0 具有相同的参数域, 所以 P_n 和 P_0 中的控制顶点是相互对应的。可得控制顶点的矢量集合 $\overline{P_0 P_n}=[\overline{P_{0_1} P_{n_1}}, \overline{P_{0_2} P_{n_2}}, \overline{P_{0_3} P_{n_3}} \dots \overline{P_{0_m} P_{n_m}}]^T$ 。控制顶点 i 的模长就是 $\|\overline{P_{0_i} P_{n_i}}\|$, 利用最大值算法获得最大的 $\|\overline{P_0 P_n}\|_{MAX}=\|\overline{P_{0_i} P_{n_i}}\|$, 其中 $1 \leq i \leq m$ 。

最大值算法:

$$\|\overline{P_0 P_n}\|_{MAX}=\|\overline{P_{0_i} P_{n_i}}\|;$$

for(j=1; 1 ≤ j ≤ m; j++)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if}(\|\overline{P_{0_j} P_{n_j}}\| > \|\overline{P_0 P_n}\|_{MAX}) \\ \|\overline{P_0 P_n}\|_{MAX}=\|\overline{P_{0_j} P_{n_j}}\|; \end{array} \right.$$

依据给定的切削深度 ε , 确定分层加工曲面的数量 n , 其关系满足:

$$\frac{\|\overline{P_0 P_n}\|_{MAX}}{n} < \varepsilon \quad (2)$$

由此可以将控制顶点的矢量集合 $\overline{P_0 P_n}$ 中的每个元素进行 n 等分, 则对应等分点的控制顶点集合 $P_i=[P_{i_1}, P_{i_2}, P_{i_3} \dots P_{i_m}]^T$ 即为变形曲面 S_i 上所有的控制顶点。依据此方法, 可以获得从源曲面为 S_0 到目标曲面 S_n 的所有分层曲面序列。

图 1 所示钢盔毛坯的剖面图。其中灰色区域为不加工的毛坯材料, 外边界为毛坯表面, 中间白色区域为待加工的钢盔, 钢盔的外表面即为工件表面。 $P_{0_1}, P_{0_2}, P_{0_3}, P_{0_4}, P_{0_5}$ 为毛坯表面上出现在此剖面的控制点, $P_{n_1}, P_{n_2}, P_{n_3}, P_{n_4}, P_{n_5}$ 为对在工件表面上的控制点。其中最长的矢量为 $\overline{P_{0_4} P_{n_4}}$, 设定切削深度 ε , 通过公式(2)算出变形曲面为 10 层。即可得到变形曲面序列, 而图中不同颜色为变形曲面序列的待加工区域。

1.2 约束条件

1.2.1 刀具半径 R

由于 T 样条曲面使用的是全曲面统一的参数

域, 因此在对工件进行粗加工的时候可以有效的减少换刀、进刀以及退刀的次数, 在某一个分层曲面上进行加工时, 可以使用同一刀具完成加工, 因此选择合适的刀具十分重要。设第 i 个分层曲面 S_i 控制顶点 P_{ij} 的曲率半径为 $\rho_{ij}^{[8-10]}$, 则选择合适的刀具就可以避免在加工的过程中发生干涉。它们满足的条件是:

$$R < \rho_{ij} \quad (3)$$

式中: $0 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq m$ 。

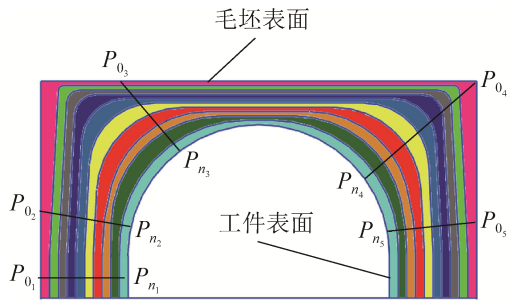


图 1 钢盔毛坯剖面图
Fig.1 Section of helmet

1.1.2 曲面间距

对于相邻的两个加工分层曲面, 两个曲面之间的距离要小于切削深度 ε , 才能保证加工切深不会过大。即满足的条件是:

$$\|\tilde{S} - S\| < \varepsilon \quad (4)$$

1.1.3 走刀行距 L

残留高度 H 是由走刀行距 L 决定的^[11], 其满足的关系是:

$$L = \frac{|\rho| \sqrt{4R(\rho + H)^2 - [(\rho + R)^2 - (\rho + H)^2]} - R^2}{(R + \rho)(H + \rho)} \quad (5)$$

其中: ρ 为曲面在刀位轨迹线垂直的平面上的平均曲率半径; R 为刀具半径, 在加工凸曲面时 R 取正, 在加工凹曲面时 R 取负。

1.3 变形曲面序列的生成

由第 1.1 节可知, 改进的变距离偏置算法就是利用曲面变形技术, 从源曲面 S_0 向目标曲面 S_n

逐渐变形, 其中的变形量由 1.2 节预设的加工参数进行约束, 进而生成一系列的变形曲面。设变形曲面集合为 $\{S_{layer}\}$, 具体步骤如下:

Step1: 取源曲面 S_0 为当前曲面 S , 并放入集合 $\{S_{layer}\}$ 中。

Step2: 运用改进的变距离偏置算法得到下一个曲面 \tilde{S} 。

Step3: 将 \tilde{S} 放入集合 $\{S_{layer}\}$ 中, 并检测 \tilde{S} 是否为目标曲面 S_n ; 若不是, 重复 Step2; 若是, 输出集合 $\{S_{layer}\}$, 即可得到所有的变形曲面序列。

2 基于曲面变形的渐进型分层加工刀具路径规划

2.1 加工分层的生成

由第 1.1 节可知, 利用改进的变距离偏置算法, 设定刀具半径、曲面间距、走刀行距为变形约束条件, 最终得到变形曲面集合 $\{S_{layer}\}$, 将集合 $\{S_{layer}\}$ 从前向后遍历并输出, 就可以得到从毛坯表面到工件表面的加工分层序列。

2.2 层内刀具路径规划

层内刀具路径可以采用多种策略, 按照数控加工的需求, 数控粗铣加工走刀方式可以分为: 行切法、环切法和空间填充法^[1-12]。其中空间填充法较为复杂, 不适合粗铣加工使用; 而行切法和环切法算法比较成熟, 故其应用比较广泛。这两种方法中, 环切法的加工余量比较均匀, 所以本文采用环切法进行路径规划。设集合 $\{T\}$ 为参数空间的限残高刀路集合, 层内刀具路径的生成步骤为:

Step1, 根据 T 样条曲面构建的 T 网格的结构^[13-14], 取参数域的边界为走刀边界, 即参数线 s_0 、 s_n 、 t_0 和 t_n 。并设定参数线 s_0 为起始刀路, 依照顺时针取 t_n 、 s_n 和 t_0 为依次走刀路径, 并将 s_0 、 t_n 、 s_n 和 t_0 依次添加到集合 $\{T\}$ 中。如图 2(a) 所示。

Step2, 根据限制残高 H 确定侧向步距 S , 即 $S=L$ 。依据平行螺旋走刀方法确定后面的加工路

径,并依次添加到集合 $\{T\}$ 中。如图2(b)所示。

Step3,把集合 $\{T\}$ 中所有参数线投影到实际空间,如图2(c)所示,即可得到层内刀路。

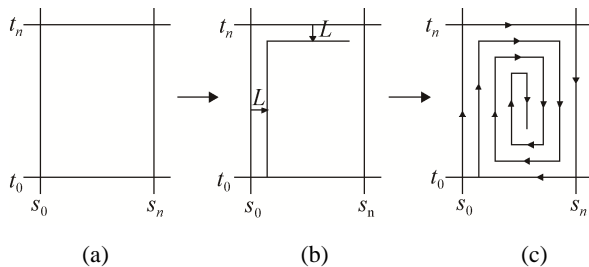


图2 层内刀具路径示意

Fig.2 Diagram of tool path in layers

2.3 渐进型分层加工刀具路径规划

设集合 $\{\tilde{T}\}$ 为渐进型分层加工的整体刀具路径集合。设 $S_{layer}[i]$ 为2.1得到第 i 个加工分层序列,结合2.2对第 i 个加工层进行层内刀具路径的规划,得到第 i 层刀具路径集合 $\{T_i\}$,并将集合 $\{T_i\}$ 放入集合 $\{\tilde{T}\}$ 。依据此方法,对集合 $\{S_{layer}\}$ 依次遍历,即可得到整体的刀具路径。

3 仿真与实验

3.1 仿真系统的开发

根据上述方法,采用Microsoft Visual Studio 2010为开发平台,以Open GL为图形引擎,开发出了基于改进式变距离偏置法的渐进型分层加工刀路生成模块。见图3,为粗铣仿真加工模块界面。

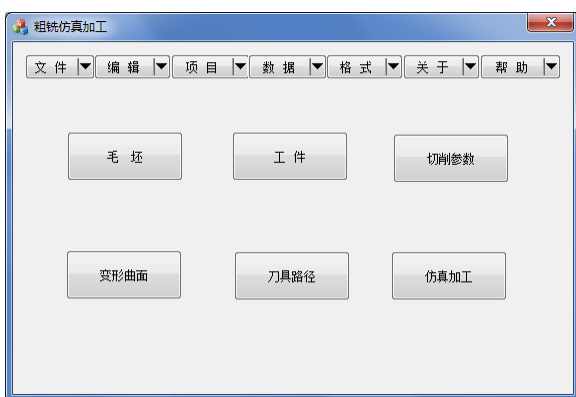


图3 粗铣仿真加工模块界面

Fig.3 Interface of rough milling simulation

如图3界面所示,其中毛坯窗口的功能是向该模块录入待加工的毛坯材料信息;工件窗口的功能是向该模块录入待加工的工件信息;切削参数窗口的功能是设置加工切削参数;变形曲面窗口的功能是根据输入的毛坯信息、工件信息和切削参数而生成的变形曲面序列,即为加工分层曲面序列并且可以查看各个加工分层的情况;刀具路径窗口的功能是根据生成的加工分层序列而规划的刀具路径,同时可以查看各个层内的刀具路径和整体刀具路径;仿真加工窗口的功能是根据上述五个窗口的信息进行仿真加工。

3.2 仿真实验及分析

3.2.1 仿真实验

根据3.1节所开发的粗铣仿真模块,本文以钢盔为模型进行了仿真实验。取边长分别为100 mm、100 mm、80 mm的长方体毛坯材料,建立钢盔的工件模型,然后在毛坯窗口和工件窗口分别录入毛坯材料和钢盔模型的信息,并设置切削参数如表1所示。

表1 切削参数

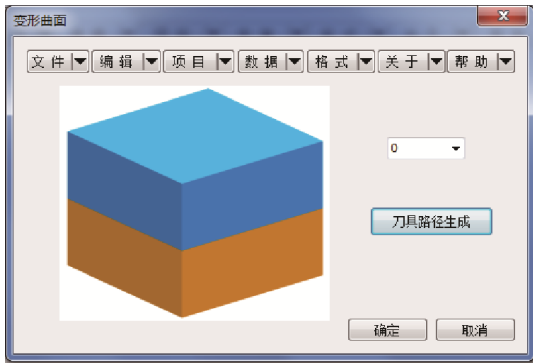
Tab. 1 Cutting parameters

参数	数值
刀具直径/mm	10
主轴转速/r·min ⁻¹	600
进给率/mm·min ⁻¹	250
切削宽度/mm	8
切削深度/mm	1

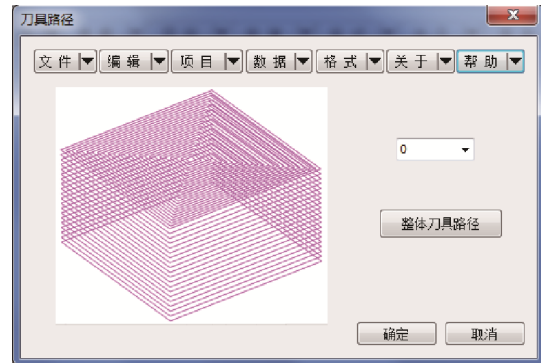
根据录入的毛坯材料和钢盔模型信息以及切削参数,在变形曲面窗口得到加工分层曲面序列,如图4所示为部分加工分层曲面。

根据已得到的加工分层序列,可以对各加工分层进行层内刀具路径规划,从而得到整个刀具路径。如图5所示为部分层内刀具路径,点击图内的整体刀具路径按钮,可以得到整体的渐进型粗铣刀具路径。

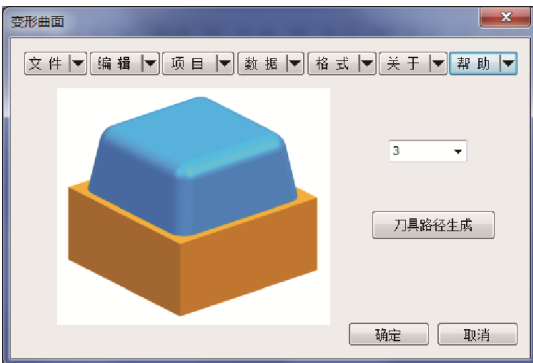
根据已得到的刀具路径,进行粗铣仿真加工,仿真的结果及相应的NC代码如图6所示。



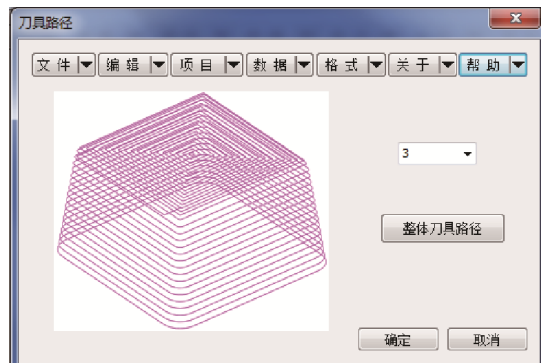
(a) 第 0 层



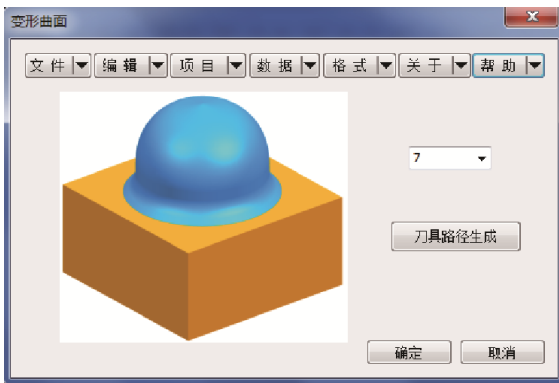
(a) 第 0 层刀具路径



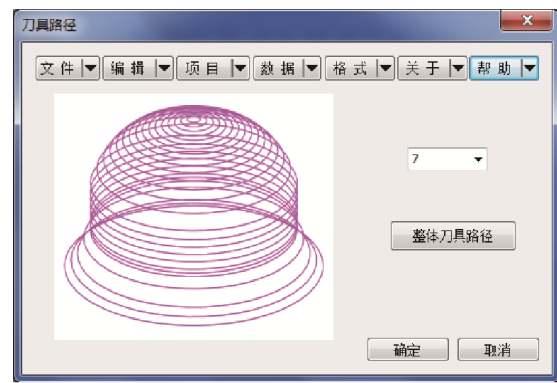
(b) 第 3 层



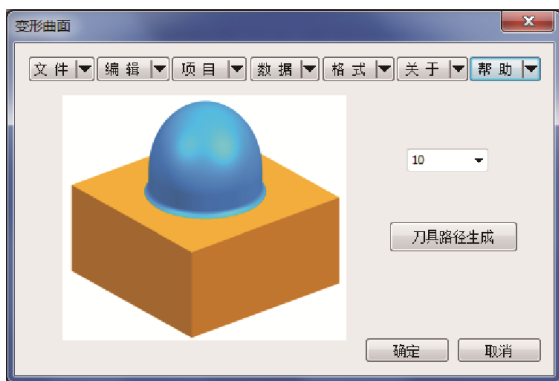
(b) 第 3 层刀具路径



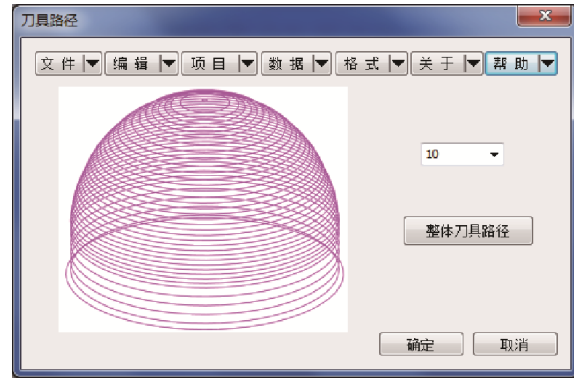
(c) 第 7 层



(c) 第 7 层刀具路径



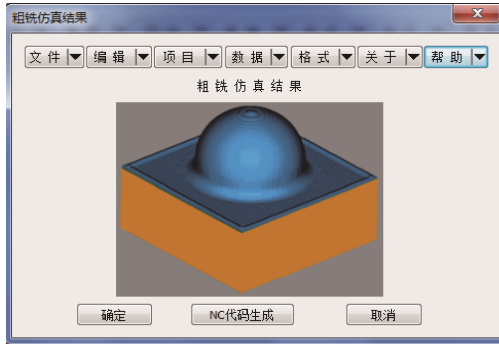
(d) 第 10 层



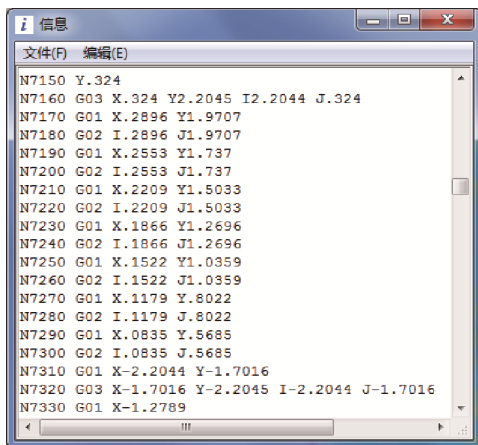
(d) 第 10 层刀具路径

图 4 部分加工分层曲面
Fig.4 Partially machined layered surface

图 5 部分层内刀具路径
Fig.5 Partially tool-path in layer



(a) 粗铣仿真结果



(b) NC 代码

图6 粗铣仿真结果及 NC 代码

Fig.6 Simulation results and NC code of rough milling

点击图 6(a)中 NC 代码生成按钮,可以生成如图 6(b)整个钢盔的粗铣 NC 代码,该代码可用于实际加工。

3.2.2 仿真结果分析

根据 3.2.1 节可知,录入毛坯材料和工件模型信息及设置加工所需的切削参数,可以得到加工分层曲面序列。

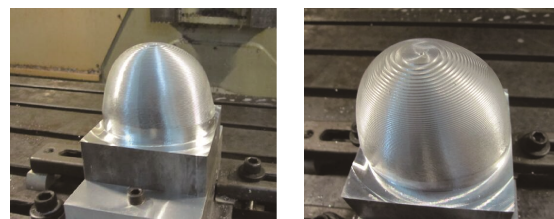
如图 4 所示,为钢盔模型的部分加工分层曲面。图 4(a)为第 0 层加工分层曲面,即为毛坯表面,也是变形曲面序列的源曲面;图 4(b)为第 3 层加工分层曲面,即为源曲面经过 3 次变换以后获得的加工分层曲面。可以看出,此时的曲面已经向工件形状靠拢;图 4(c)为第 7 层加工分层曲面,即为源曲面经过 7 次变换以后获得的加工分层曲面。可以看出,此时的曲面基本具备工件的形状;

图 4(d)为第 10 层加工分层曲面,即为工件表面,也是变形曲面的目标曲面。由图 4 可知,通过录入毛坯材料、工件模型信息和设置的切削参数,运用本文提出的改进的变距离偏置法可以获得合理的曲面变形序列,最终得到合适的加工分层曲面序列。

如图 5 所示,为钢盔模型的部分加工分层曲面的刀具路径和整个钢盔模型加工的刀具路径。图 5(a)为第 0 层刀具路径,即为源曲面的层内刀具路径。由于是毛坯表面,此路径为等边长的长方形序列;图 5(b)为第 3 层刀具路径,即为第 3 层加工分层曲面的层内刀具路径。可以看出,此时的刀具路径是长方形序列,并且从下到上边长依次递减;图 5(c)为第 7 层刀具路径,即为第 7 层加工分层曲面的层内刀具路径。由于该曲面基本具备工件的形状,所以其刀具路径为大小不一的圆形序列;图 5(d)为第 10 层加工分层曲面,即为目标曲面的层内刀具路径。由于经过该曲面的加工即可得到工件模型,因此刀具路径为比较紧密的圆形序列;由图 5 可知,依据得到加工分层序列,通过本文提出的渐进型分层刀具路径规划可以得到合理的层内刀具路径,以及整体的渐进型粗铣刀具路径。如图 6 所示,为经过上述五个窗口的操作之后进行的仿真加工。由图 6 可知,该仿真模块可以实现本文提出的渐进型粗铣方法,并且可以进行完整的仿真操作。

3.3 实验验证及分析

在 XH715 立式加工中心上进行实验验证,实际加工如图 7 所示。



(a) (b)

图7 实际加工图

Fig.7 Actual processing

如图 7(a)所示为本文方法进行实际加工的工件,如图 7(b)所示为使用等高度分层方法加工后获得的工件。对工件进行随机点采样,检测随机点的残留高度值。得到的结果如表 2 所示。

表 2 残留高度值(mm)
Tab. 2 Residual height

序号	等高度分层法(实际值)	渐进型分层法	
		仿真值	实际值
1	0.232	0.226	0.228
2	0.258	0.231	0.229
3	0.286	0.228	0.231
4	0.291	0.233	0.230
5	0.334	0.231	0.231
6	0.352	0.232	0.229
7	0.359	0.232	0.232
8	0.412	0.230	0.234
9	0.496	0.229	0.233
10	0.583	0.234	0.235

从表 2 结果可知,使用 3.1 节开发的仿真模块的仿真值和实际加工值相差不多,相对误差不超过 10%,这表明开发的仿真模块可以满足实际的加工需求。并且使用等高度分层法加工后的工件,其残留高度由 0.286 mm 到 0.583 mm,其波动范围大,加工余量不均匀,成形表面粗糙,而使用本文提出的渐进型分层粗铣加工法加工后的工件,其残留高度从 0.228 mm 到 0.235 mm,平均值在 0.231 mm 左右,波动范围小,加工余量更加均匀,成形表面更光滑。

4 结论

针对传统等高度分层法的加工余量不均、成形表面粗糙等缺点,本文提出一种渐进型分层方法。首先,利用 T 样条曲面建模具有统一参数域这一特点,提出一种改进的变距离偏置算法,得到一系列的变形曲面序列。其次,基于该算法,设定加工参数为约束条件,得到加工分层序列,为各层设定层内加工方法,进而得到整个渐进型分层加工刀路。利用 VS2010 和 OpenGL 开发出仿真模块,并对本文提出的方法进行仿真验证,证明此模块可以

实现本文提出的渐进型粗铣方法。通过实际加工验证表明,开发的仿真模块可以满足实际加工要求,并且本文提出的渐进型分层粗铣加工法加工后的工件,加工余量更加均匀,成形表面更光滑,为后续获得更加光顺的刀具轨迹、提高加工过程中的稳定性和精加工表面质量奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 刘永云, 孙传俊, 王振, 等. 数控粗加工走刀和进刀方式的研究[J]. 模具制造, 2007, 2: 62-65.
Liu Yongyun, Sun Chuanjun, Wang Zhen, et al. Research on Tool Path mode and Fees Mode in Numerical Control Rough Maching[J]. Die&Mould Manufacture, 2007, 2: 62-65.
- [2] 李居莉. 基于 T 样条的车身点云曲面重构技术研究[D]. 山东: 山东理工大学, 2014.
Li Juli. The Research on Method of Automobile Body Point Cloud Surface Reconstructon Technology Based on T splines[D]. Shandong: Shandong University of Technology, 2014.
- [3] Anonymous. T-Splines, Inc. T-Splines Version 3 Organic Modeling for Rhino Design Program Released [J]. Transportation Business Journal (S2210-5395), 2011, 13(4): 3915-3921.
- [4] 何钢, 廖文和, 刘浩, 等. Catmull-Clark 细分曲面的变距离偏置[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 3: 424-428.
He Ggang, Liao Wenhe, Liu Hao, et al. Variable offset of Catmull-Clark subdivision surface[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition, 2008, 3: 424-428.
- [5] 严涛, 刘志兵, 王西彬, 等. 基于四点偏置法的非可展直纹面侧铣刀位计算[J]. 图学学报, 2015, 36 (6): 840-845.
Yan Tao, Liu Zhibin, Wang Xibin, et al. Cutter Location Calculation Based on the Four Offset Method of Flank Milling for Undevelopable Ruled Surface[J]. Journal of Graphics, 2015, 36(6): 840-845.
- [6] 曹利新, 薛亚峰. 闭式叶轮通道五轴数控粗加工刀具路径规划[J]. 大连理工大学学报, 2013 (4): 514-520.
Cao Lixin, Xue Yafeng. Tool-path planning for 5-axis nc rough machining of closed impeller channel[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013(4): 514-520.
- [7] Mehmet nder, H. Hüseyin Uurlu. Dual Darboux Frame of a Timelike Ruled Surface and Darboux Approach to Mannheim Offsets of Timelike Ruled Surfaces[J].

- Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical sciences, 2013, 83(2), 163-169.
- [8] 单晨伟, 廖恺, 成宏军, 等. 一种叶片截面线光顺及等距面生成方法[J]. 航空制造技术, 2015, 470 (1/2): 115-118.
Shan Chenwei, Liao Kai, Cheng Hongjun, et al. Method of Cross-Section Curve Fairing and Generation of Equidistant Offset Surface For Blade Surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology | Aeron Manuf Technol, 2015, 470 (1/2): 115-118.
- [9] 徐金亭, 刘伟军, 卞宏友, 等. 基于网格曲面模型的等残留刀位轨迹生成方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 193-198.
Xu Jinting, Liu Weijun, Bian Hongyou, et al. Constant Scallop Tool Path for Triangular Surface Machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 193-198.
- [10] 杨红涛, 刘伟军, 张鸣, 等. 复杂曲面投影法精加工刀轨生成[J]. 机械设计与制造, 2012(2): 197-199.
Yang Hongtao, Liu Weijun, Zhang Ming, et al. Projection complex surface finishing tool path generation [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(2): 197-199.
- [11] 严思杰, 周云飞, 赖喜德, 等. 多轴加工刀轨最优行距计算方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(5): 35-38.
Yan Sijie, Zhou Yunfei, Lai Xide, et al. Research on the Method of Calculating the Cutter Location Optimal Path Interval in Muti-Axis Machining [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2006, 42(5): 35-38.
- [12] 段振云, 宋扬, 赵文辉. 点云直接生成模具数控程序的算法研究[J]. 机械, 2015(4): 23-26.
Duan Zhenyun, Song Yang, Zhao Wenhui. Study on the algorithm of generating mould NC program by point cloud directly[J]. Machinery, 2015(4): 23-26.
- [13] 乔桂新, 温维亮, 郭新宇, 等. 基于T样条拼接的彩椒果实可视化研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(6): 1227-1231.
Qiao Guixin, Wen Weiliang, Guo Xinyu, et al. Research on Visualization of Bell Pepper Fruit Based on T-Splines Merging[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(6): 1227-1231.
- [14] Ahmad H Nasri, Khaled Sinno, Jianmin Zheng. Local T-spline surface skinning[J]. The Visual Computer (S0178-2789), 2012, 28(6): 787-797.

(上接第 1398 页)

- [22] 陈家焱, 陈章位, 周建川, 等. 基于泊松过程的超高斯随机振动试验控制技术研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 19-22.
Chen Jiayan, Chen Zhangwei, Zhou Jianchuan, et al. Super-Gaussian Random Vibration Test Control Technique Based on Poisson Process[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 19-22.
- [23] Wen Fei, Wan Qun. Time Delay Estimation Based on Mutual Information Estimation[C]// International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2009: 3857-3861.
- [24] Cao L. Practical Method for Determining the Minimum Embedding Dimension of a Scalar Time Series[J]. Physica D-nonlinear Phenomena (S0167-2789), 1997, 110(1/2): 43-50.
- [25] 蔡烽, 刘博, 石爱国. 基于多变量加权一阶局域法多步预报模型的舰船摇荡预报[J]. 船舶力学, 2014(7): 794-798.
Cai Feng, Liu Bo, Shi Aiguo. Ship Motion's Prediction Based on Multivariate Add-weighted One-rank Local-region Multi-steps Method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014(7): 794-798.
- [26] Deng Julong. Introduction to Grey System Theory[J]. Journal of Grey System (S0957-3720), 1989, 1(1): 1-24.