

# 基于曲面分区的多道次数控渐进成形轨迹生成\*

朱 虎 刘志军 扶建辉

(沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136)

**【摘要】** 为实现含有直壁等难成形曲面的高效成形,以三角网格模型为研究对象,提出基于曲面分区的个性化多道次数控渐进成形方式和在各曲面分区内进行各道次成形加工所需轨迹生成方法。给出了基于可成形性的三角网格曲面分区算法和通过偏置来生成各曲面分区多道次螺旋线成形轨迹的方法。算法应用实例表明,该方法能够对曲面进行分区,并为相关曲面分区生成光滑连续的多道次螺旋线成形轨迹。

**关键词:** 渐进成形 多道次成形 曲面分区 成形轨迹

**中图分类号:** TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)09-0230-05

## Multi-stage CNC Incremental Forming Path Generation Based on Surface Zoning

Zhu Hu Liu Zhijun Fu Jianhui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

### Abstract

In order to realize the efficient forming of difficulty forming surfaces such as vertical wall, the method of multi-stages CNC incremental forming with individuation was proposed based on the surface zoning for the triangular mesh model, and the generation method of the path which needed by each stage forming in the surface zone was studied. A triangular mesh surface zoning approach based on formability was given. Moreover a strategy to generate multi-stage spiral forming tool path for each surface area by offset was presented. The case studies indicated that the proposed method could realize surface zoning and generate smooth and successive multi-stage spiral forming path for the corresponding surface zones.

**Key words** Incremental forming, Multi-stage forming, Surface zoning, Forming path

### 引言

金属板材数控渐进成形技术是最近发展起来的一种柔性的无模成形技术<sup>[1]</sup>。该技术不使用昂贵的模具,可直接由CAD数据快速、经济地制造出板材件,并可广泛应用于样件试制和多品种小批量生产,在航空、汽车等制造领域具有广阔的应用前景,成为国内外制造技术研究的热点<sup>[2~3]</sup>。

金属板材数控渐进成形的一个难点是直壁等成形角较小的曲面成形<sup>[4]</sup>。目前对诸如直壁等这些难成形曲面的数控渐进成形的研究大多基于多道次成形方法<sup>[5~13]</sup>。多道次数控渐进成形虽然能够解决直壁等难成形曲面的成形问题,但也存在着由于进行多次反复成形加工而成形效率低的缺点。本文

以三角网格模型为研究对象,提出基于曲面分区的个性化不同道次数控渐进成形方式及其各曲面分区内各道次成形加工所需要的轨迹生成方法,以实现包含有难成形曲面的板材件的高效成形。

### 1 基于曲面分区的多道次成形方式

曲面板材件各处的成形性不尽相同,既有难成形区域,也有易成形区域。为了实现对包含有难成形曲面的板材件的高效成形,需要对成形性不同的曲面组成的板材件进行分区不同道次的成形加工。这就要求在规划和生成轨迹时要根据各曲面区域的成形性,识别出成形性不同的曲面,并加以分区处理,进而规划并生成可对各曲面分区,进行不同道次成形加工的轨迹,从而根据其成形性有针对性地仅

收稿日期: 2010-11-02 修回日期: 2010-11-25

\* 航空科学基金资助项目(2009ZA54005)

作者简介: 朱虎,教授,博士,主要从事数字化设计与制造研究,E-mail: zhuhu100@yahoo.com.cn

对面上的难成形曲面进行个性化的多道次成形,以提高成形效率和质量。不难看出,基于曲面分区的多道次数控渐进成形方式的关键问题是基于成形性的曲面分区和在各曲面分区内生成各道次成形加工所需要的轨迹。

## 2 三角网格曲面分区算法

曲面分区时,应考虑可成形性和数控渐进成形工艺要求。在数控渐进成形过程中,成形板材的厚度按正弦定律减薄<sup>[14]</sup>,即  $t = t_0 \sin\theta$ , 其中  $t$  为变形后的板材厚度,  $t_0$  为原始板材厚度, 成形半锥角  $\theta$  是板材成形面与垂直方向的夹角, 如图 1 所示。由  $t = t_0 \sin\theta$  可知, 如果曲面的成形半锥角  $\theta$  越小, 成形区板材厚度就越小, 也就更容易发生破裂, 其成形性也就越差。因此, 就可根据曲面上各个位置上的成形半锥角  $\theta$  来判断曲面各处的成形性。

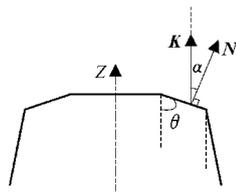


图1 成形半锥角  
Fig.1 Forming half cone angle

对于由三角面片组成的三角网格模型来说, 成形半锥角  $\theta$  可利用  $Z$  轴方向向量  $K$  和每个三角面片的法向量  $N$  求得, 即  $\theta = 90^\circ - \alpha$ 。本文根据所能一次成形的最小极限角  $\theta_{\infty}$  来进行曲面分区。 $\theta_{\infty}$  由用户根据板材的材料性能和设备工况决定。

曲面分区的具体方法是首先考察三角网格模型的每个三角面片的成形半锥角  $\theta$ , 根据条件  $\theta < \theta_{\infty}$  找出所有难成形三角面片, 求出所有难成形三角面片与可一次成形三角面片所共享顶点  $z$  坐标值  $Z_i (i = 1, 2, \dots, n)$  并由大到小排列; 然后判断  $Z_1$  与  $Z_{i+1}$  之间是否存在难成形三角面片, 若存在, 则将  $i$  加 1, 继续往下判断, 一直到不存在为止。例如, 在图 2 中,  $Z_1$  与  $Z_2$  之间存在难成形三角面片, 则继续往下判断; 若不存在, 例如  $Z_4$  与  $Z_5$  之间不存在难成形三角面片, 则  $Z_1$  和  $Z_4$  之间为难成形分区 1, 而  $Z_4$  与  $Z_5$  之间为可一次成形分区之一。按此方法沿  $Z$  轴自上而下依次判断, 直到最低点。最后以各分界  $Z$  值, 利用水平面切割三角网格模型, 并将各交线排序连接得到各分区的边界线。这样按照曲面成形性的不同, 把整个曲面划分成沿着  $Z$  轴顺次排列的曲面区域。曲面分区算法的流程图如图 3 所示。

## 3 各曲面分区成形轨迹生成

为在各曲面分区内进行不同道次的成形加工, 需要生成适合于各曲面分区的成形轨迹。为此, 首先以曲面分区之前的整体曲面, 采用朱虎<sup>[15]</sup>的方法

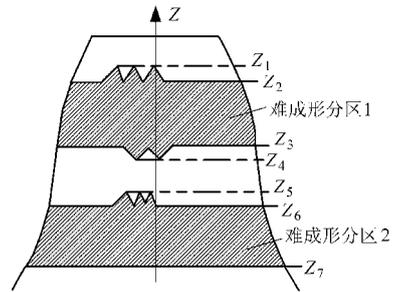


图2 曲面分区  
Fig.2 Surface zoning

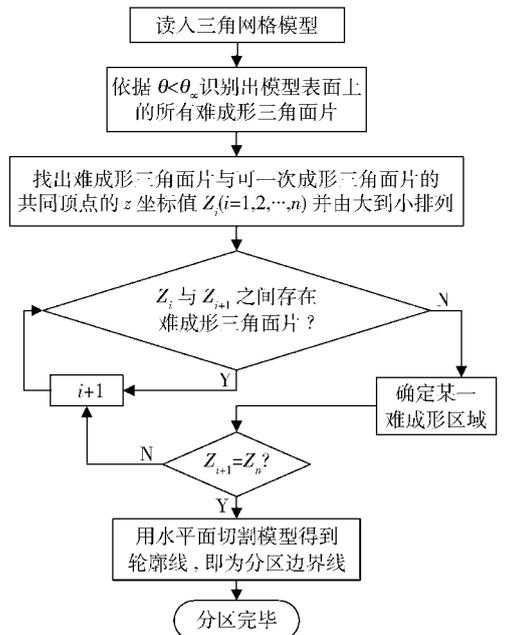


图3 曲面分区流程  
Fig.3 Surface zoning procedure

生成一个基础螺旋线轨迹, 然后把它分割成对应于各曲面分区的轨迹段, 而对于需要进行多道次成形的曲面分区, 还要通过偏置相应的轨迹段来生成多道次成形轨迹。为将此基础螺旋线轨迹分割成对应于各曲面分区的轨迹段, 过各曲面分区的分界线作若干个垂直于  $Z$  轴的平面与螺旋线轨迹求交, 并利用交点实现基础螺旋线轨迹的分割。最后在各螺旋线轨迹段上取一系列点, 并将这些点按照多道次成形要求, 进行偏置、连接来生成各曲面分区所需要的多道次成形螺旋线轨迹。为提高偏置精度, 需将由线段构成的基础螺旋线轨迹进行细分处理, 也就是把组成基础螺旋线轨迹的线段细分成微小段, 并取其端点为待偏置点, 其中线段细分处理精度可由用户决定。从上可知, 在多道次轨迹生成中非常关键的问题是确定各点的偏置方向和偏置距离, 具体方法如下:

### (1) 偏置方向的确定

过待偏置的螺旋线轨迹段上的任意一点  $C$ , 用

水平面切割原模型等距偏置刀具半径得到的等距模型,得到轮廓交线  $L_0$ ,如图4所示。在轮廓交线  $L_0$  上,若  $C$  点与相邻  $C_1$ 、 $C_2$  两点不共线,则把  $C_1C$  和  $C_2C$  两直线的角平分线方向  $P$  作为点  $C$  的偏置方向,即

$$\frac{C_1C}{|C_1C|} + \frac{C_2C}{|C_2C|} = P \quad (1)$$

若  $C$  点与相邻  $C_1$ 、 $C_2$  两点共线,则在切割平面上,以与直线  $C_1C_2$  垂直的方向作为点  $C$  的偏置方向。

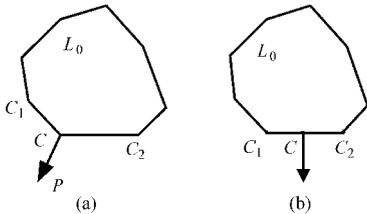


图4 偏置方向

Fig.4 Offset directions

### (2) 偏置距离计算

针对如图5所示的模型,以对难成形曲面进行三道次成形加工为例,说明偏置距离的计算方法。待偏置的螺旋线轨迹段上某一点  $A$  的偏置距离与该点所在分区的最高点的  $z$  坐标值  $Z_{max}$ 、该点在  $Z$  轴方向的距离  $h$  ( $Z_{max}$  与该点  $z$  坐标值之差) 和各道次成形的偏置角 ( $\beta_1, \beta_2$ ) 有关。各曲面分区的成形加工次数和各道次成形的偏置角由用户根据板材的材料性能和设备工况决定。为生成第1道次成形轨迹,点  $A$  所需偏置距离为  $l_{AA_1}$ ,而为生成第2道次成形轨迹,点  $A$  所需偏置距离为  $l_{AA_2}$ ,具体计算方法如下:①过曲面分区的最高点作水平切割平面,切割原模型等距偏置刀具半径得到的等距模型,切割交线为多边形  $L_1$ 。②过待偏置点  $A$  和该点的偏置方向作竖直切平面,与多边形  $L_1$  相交于交点  $Q_j$  ( $j=0, 1, \dots, n$ )。③从交点  $Q_j$  中提取在工件模型表面上位于

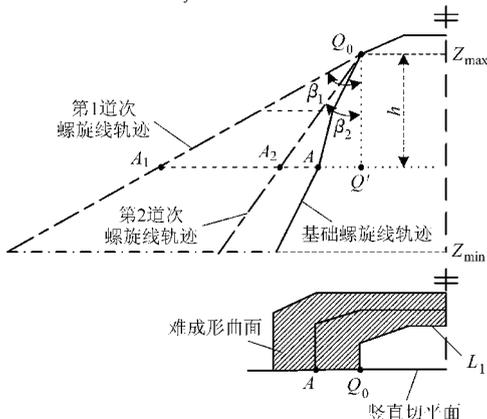


图5 偏置距离的计算

Fig.5 Offset distance calculation

$A$  点同侧的点  $Q_0$ 。为此,在多边形  $L_1$  中,将不平行于竖直切平面的边提取出来,并求出这些边与竖直切平面的交点,其中与  $A$  点最近的交点便是所要求的点  $Q_0$ 。④在竖直切平面上,作垂直于直线  $AQ'$  的直线  $Q_0Q'$ ,垂足为  $Q'$ 。那么为生成第1道次成形轨迹, $A$  点应该偏置的距离  $l_{AA_1}$  为

$$l_{AA_1} = l_{A_1Q'} - l_{AQ'} \quad (2)$$

其中  $l_{A_1Q'} = h / \cot\beta_1 \quad (3)$

同理,可以用上述方法求出轨迹上其他点的偏置距离。

## 4 算法应用实例

算法在 Windows XP 环境下利用 Visual C++ 和 OpenGL 实现。为验证本算法的可行性,以如图6所示的三角网格模型为对象,进行了曲面分区、不同道次数渐近成形螺旋线轨迹生成应用探讨。

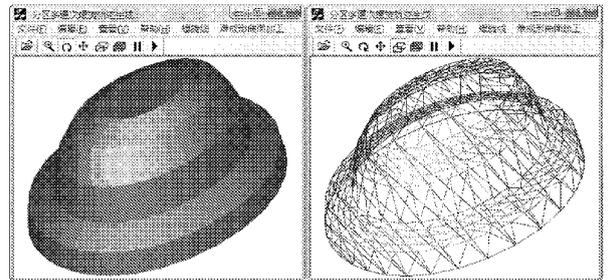


图6 STL模型

Fig.6 STL model

图7所示为识别出的难成形曲面和曲面分区结果,其中输入的板材极限成形角  $\theta_{\infty}$  是  $36^\circ$ 。该模型曲面一共被分成4个成形区域(即分区  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ ),其中曲面分区  $S_2$  和曲面分区  $S_4$  为难成形曲面分区。对于曲面分区  $S_1$  和  $S_3$  进行一道次成形加工,而对难成形曲面分区  $S_2$  和  $S_4$  进行三道次成形加工。

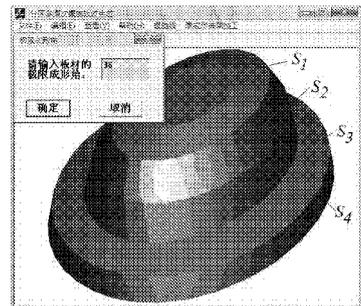


图7 曲面分区

Fig.7 Surface zoning

图8显示了基础成形(最终道次)螺旋线轨迹,采用挤压工具头半径为10 mm,螺旋线螺距为8 mm。图9显示了为生成多道次成形螺旋线轨迹,在基础螺旋线轨迹上截取的对应于难成形曲面分区的轨迹段。图10是将对应于难成形曲面分区的基础螺旋

线轨迹段偏置后生成的第2道次成形螺旋线轨迹,其偏置角度是 $25^\circ$ 。图11是将对应于难成形曲面的基础螺旋线轨迹偏置后生成的第1道次螺旋线轨迹,其偏置角度是 $60^\circ$ 。为了考察曲面分区多道次成形过程,本文对上述成形过程进行了计算机仿真。图12和图13显示的是难成形区 $S_2$ 的第2道次和第3道次成形仿真模型。图14给出了整个模型完

成全部成形过程后所得到的最终仿真模型,从图中可以看出,通过本文提出的曲面分区多道次成形方法生成与图6所示模型一样的仿真模型。

### 5 结束语

根据曲面可成形性的不同,对包含有难成形曲面的板材件进行分区,进而有针对性地仅对板材件

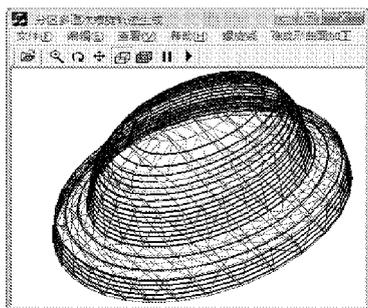


图8 基础螺旋线轨迹  
Fig. 8 Base spiral path

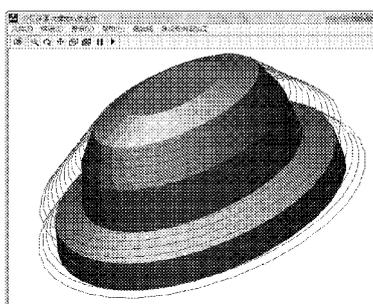


图10 第2道次螺旋线轨迹  
Fig. 10 The second stage spiral path

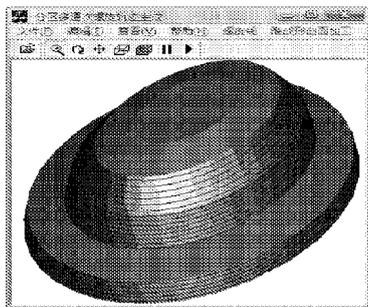


图9 螺旋线轨迹的截取  
Fig. 9 Intercepted spiral path

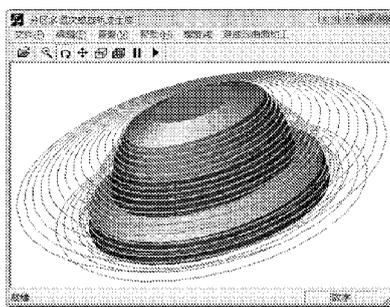


图11 第1道次螺旋线轨迹  
Fig. 11 The first stage spiral path

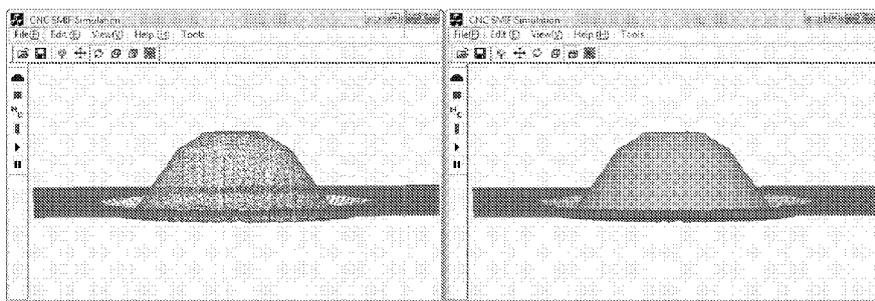


图12 难成形区 $S_2$ 的第2道次成形仿真模型  
Fig. 12 Simulation model of the second stage forming for  $S_2$

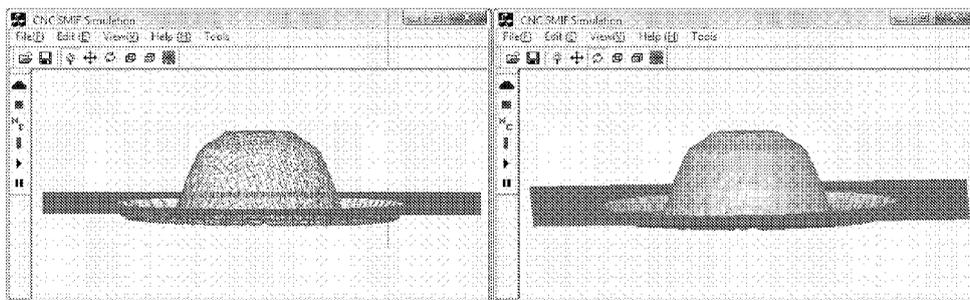


图13 难成形区 $S_2$ 的第3道次成形仿真模型  
Fig. 13 Simulation model of the third stage forming for  $S_2$

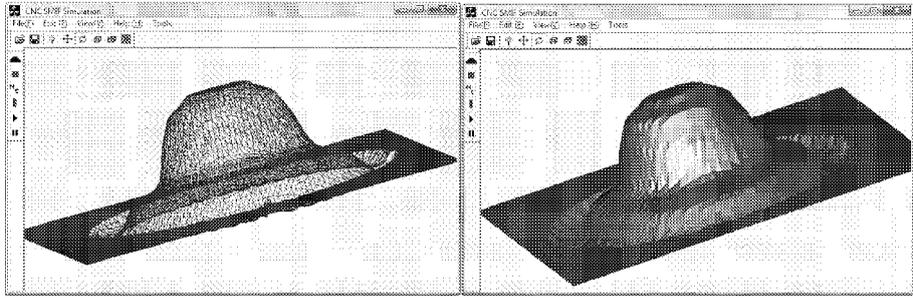


图 14 最终成形仿真模型

Fig. 14 Simulation model of the final forming

上的难成形区域进行多道次成形加工,从而提高成形质量和效率。又由于多道次成形采用螺旋线轨迹,使得各道次成形较比等高线成形方式平稳且反弹小,有助于提高成形精度。本文提出的方法能够

对板材件曲面进行合理分区,并能生成光滑连续的多道次螺旋线成形轨迹,通过对曲面分区多道次成形过程的计算机仿真能够得到预期的仿真模型。

### 参 考 文 献

- 莫健华, 韩飞. 金属板材数字化渐进成形技术研究现状[J]. 中国机械工程, 2008, 19(4): 491~497.  
Mo Jianhua, Han Fei. State of the arts and latest research on incremental sheet NC forming technology[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(4): 491~497. (in Chinese)
- Kochan A. Dieless forming[J]. Assembly Automation, 2001, 21(4): 321~322.
- Micari F, Ambrogio G, Filice L. Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming state of the art and future trends[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1~3): 390~395.
- Ham M, Jeswiet J. Forming limit curves in single point incremental forming[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 277~280.
- Skjoedt M, Silva M B, Martins P A, et al. Strategies and limits in multi-stage single-point incremental forming [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2010, 45(1): 33~44.
- Skjoedt M, Bay N, Endelt B, et al. Multistage strategies for single point incremental forming of a cup [J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(Supp.): 1199~1202.
- Verbert J, Belkassam B, Henrard C, et al. Multi-step toolpath approach to overcome forming limitations in single point incremental forming [J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(Supp.): 1203~1206.
- Bambach M, Araghi T B, Hirt G. Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming [J]. Production Engineering, 2009, 3(2): 145~156.
- 王莉, 莫健华, 黄树槐, 等. 金属薄板直壁件数字化渐进成形过程的实验研究[J]. 锻压技术, 2004, 29(6): 9~11.  
Wang Li, Mo Jianhua, Huang Shuhuai, et al. Experimental study of straight-wall parts forming process based on sheet metal digital incremental forming [J]. Forging & Stamping Technology, 2004, 29(6): 9~11. (in Chinese)
- 贾俐俐, 高锦张, 王书鹏. 直壁筒形件多道次增量成形工艺研究[J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(19): 133~135.
- 袁军, 莫建华, 刘杰, 等. 板材数字化成形加工路径规划研究[J]. 金属成形工艺, 2003, 21(2): 27~29.
- 邵兴彬, 高锦张, 贾俐俐, 等. 板料增量成形中路径缩放的应用研究[J]. 中国制造业信息化, 2008, 37(17): 67~69.  
Shao Xingbin, Gao Jinzhang, Jia Lili, et al. The research of incremental forming by scaling the path [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2008, 37(17): 67~69. (in Chinese)
- Hirt G, Ames J, Bambach M, et al. Forming strategies and process modeling for CNC incremental sheet forming[J]. Annals of the CIRP, 2004, 53(1): 203~206.
- Young D, Jeswiet J. Wall thickness variations in single point incremental forming [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218(11): 1453~1459.
- 朱虎, 扶建辉. 金属板材数控渐进成形螺旋线轨迹生成[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 223~226.  
Zhu Hu, Fu Jianhui. Generation of spiral tool path for sheet metal CNC incremental forming [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 223~226. (in Chinese)