

板料渐进成形工艺等高线图生成方法的研究

刘根林¹,周晚林²

(1. 盐城工学院 基础教学部,江苏 盐城 224051; 2. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:板料数字化渐进成形工艺可以通过数控渐进成形机床加工出成形极限较大、形状复杂的板材零件,在航空航天、汽车和民用产品的小批量钣金件加工方面具有广泛的应用前景。如何生成成形零件的等高线图是该工艺的关键技术。对板料渐进成形工艺等高线图的生成方法进行了研究,提出一种基于 Matlab 拟合 Bézier 曲面并快速生成等高线图的方法。对理论抛物面和飞机翼面的仿真研究表明,提出的等高线图的生成方法,工程精度较高、算法简单。计算速度快,适合在板料数字化渐进成形工艺中推广应用。

关键词:渐进成形;等高线图;Bézier 曲面;Matlab

中图分类号:TG3,V26,O24 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2009)03-0015-04

金属板料数控渐进成型技术属于先进制造技术,是顺应现代制造业所要求的快速、低成本、柔性等技术趋势而产生的^[1]。该方法由于不是针对特定板壳零件采用模具一次拉深成形,可加工任意复杂形状的工件,省去了产品设计过程中因模具设计、制造、实验修改等复杂过程所消耗的时间和资金^[2],极大地降低了新产品开发的周期和成本。所以,对于飞机、卫星等多品种小批量产品的开发具有重要的应用价值^[3]。金属板料数控渐进成形工艺需要应用 CAD/CAM 系统来进行建模及编程,常涉及到曲面的造型设计和测量问题。对某些不规则曲面的测量,往往根据工程的物理背景或实验测量方法首先得到的是若干曲面测量控制点的三维坐标。而板料渐进成形工艺中压头(工具头)的轨迹是板料成形零件的等高线图^[4]。因此,只有根据板料成形后零件表面上的测量控制点先拟合成三维曲面,并继而得到板料成形后零件的等高线图,才能获得压头的运动轨迹并得到相应的数控加工 G 代码,最终完成板料零件的渐进成形。本文提出一种基于 Matlab 由离散点构成任意 Bézier 曲面的等高线图的算法,并开发了相应的应用程序。文中以理论抛物曲面和飞机翼面为数值算例,验证了该方法的可行性。

1 数字化渐进成形原理

渐进成形技术采用了快速原型技术中“分层制造”的思想,将复杂三维钣金件的整体成形变为数控机床上利用简单通用压头按 CAD 数模进行的逐层渐进成形。成形过程中成形工具与板料局部接触,在成形工具作用力的作用下,接触点周围很小区域处于受压状态而发生塑性变形。数字化渐进成形的原理就是依靠逐次变形累积(即以成形工具运动形成的包络面)产生整体的变形。如图 1 所示,用专用夹具将金属板坯料夹紧,然后将该装置固定在专用数控机床的工作台上,成形工具在 NC 程序的控制下加工出所要成形的零件形状^[5]。数字化渐进成形使用的成形工具是具有球状的压头,压头在一点压向板材,使之产生一定的变形,然后按照成形零件的等高线轨迹运动,在整个运动过程中板料连续变形,完成一条轨迹的变形运动后,将成形工具头抬起,移向下一条轨迹的起点,重复上述运动,最终加工出要求的形状。

2 等高线生成算法

2.1 Bézier 曲线

在空间给定 $n+1$ 个控制点 $V_i (i=0, 1, \dots,$

收稿日期:2009-03-02

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2006190)

作者简介:刘根林(1965-),女,江苏盐城人,硕士,讲师,主要研究方向为力学量测试技术。

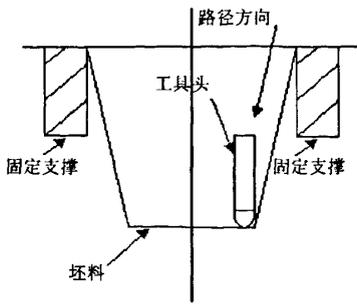


图 1 数字化渐进成形示意图
Fig. 1 The diagram of the digital incremental sheet metal forming

n), n 次的 Bézier 参数曲线(如图 2)为^[6]:

$$\vec{r}(u) = \sum_{i=0}^n J_{n,i}(u) \vec{V}_i, 0 \leq u \leq 1 \quad (1)$$

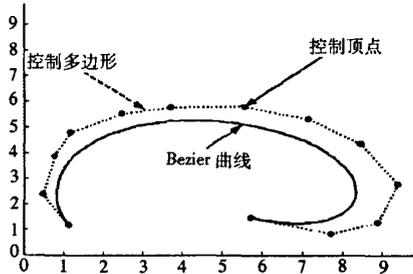


图 2 Bézier 曲线
Fig. 2 Bézier curve

式中, $J_{n,i}(u) = C_n^i u^i (1-u)^{n-i}$ (2)
称为伯恩斯坦基函数(Bernstein Basis)。其中:

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (3)$$

常用的三次 Bézier 曲线为

$$\vec{r}(u) = \sum_{i=0}^3 (C_3^i u^i (1-u)^{3-i}) \vec{V}_i = [1 \ u \ u^2 \ u^3] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_0 \\ \vec{V}_1 \\ \vec{V}_2 \\ \vec{V}_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 双三次 Bézier 曲面

用控制多边形网格(特征网格)替代点矢、切矢与扭矢构造 Bézier 曲面。与双三次曲面类似, Bézier 曲面也是笛卡尔积曲面。常用的双三次 Bézier 曲面(如图 3)为

$$\vec{r}(u, v) = [J_{3,0}(u) \ J_{3,1}(u) \ J_{3,2}(u) \ J_{3,3}(u)]$$

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{0,0} & \vec{V}_{0,1} & \vec{V}_{0,2} & \vec{V}_{0,3} \\ \vec{V}_{1,0} & \vec{V}_{1,1} & \vec{V}_{1,2} & \vec{V}_{1,3} \\ \vec{V}_{2,0} & \vec{V}_{2,1} & \vec{V}_{2,2} & \vec{V}_{2,3} \\ \vec{V}_{3,0} & \vec{V}_{3,1} & \vec{V}_{3,2} & \vec{V}_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{3,0}(u) \\ J_{3,1}(u) \\ J_{3,2}(u) \\ J_{3,3}(u) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \vec{V}_{i,j} J_{3,i}(u) J_{3,j}(v) \quad (5)$$

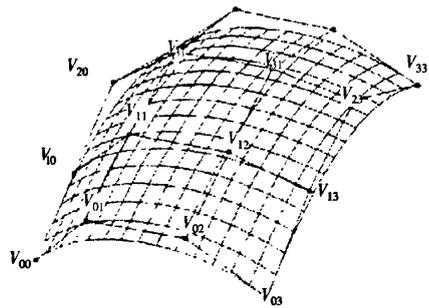


图 3 双三次 Bézier 曲面
Fig. 3 The double three time Bézier curved surface

2.3 由离散点拟合曲面并生成等高线的算法

本文给出 16 个随机离散点作为构成曲面的控制顶点, 构成 4×4 阶三维坐标矩阵, 利用 Matlab 软件进行编程, 拟合 Bézier 曲面。根据公式

$$\vec{r}(u, v) = [J_{3,0}(u) \ J_{3,1}(u) \ J_{3,2}(u) \ J_{3,3}(u)]$$

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_{0,0} & \vec{V}_{0,1} & \vec{V}_{0,2} & \vec{V}_{0,3} \\ \vec{V}_{1,0} & \vec{V}_{1,1} & \vec{V}_{1,2} & \vec{V}_{1,3} \\ \vec{V}_{2,0} & \vec{V}_{2,1} & \vec{V}_{2,2} & \vec{V}_{2,3} \\ \vec{V}_{3,0} & \vec{V}_{3,1} & \vec{V}_{3,2} & \vec{V}_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{3,0}(u) \\ J_{3,1}(u) \\ J_{3,2}(u) \\ J_{3,3}(u) \end{bmatrix} = [1 \ u \ u^2 \ u^3] [M_{BE}] [V] [M_{BE}]^T [1 \ v \ v^2 \ v^3]^T \quad (6)$$

$$\text{式中, } M_{BE} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

当 u 从 0 到 1 变化的时候构造 4 条 Bézier 曲线(准线)。固定 v 坐标与准线的 4 个交点作为特征多边形顶点, 构造一条 Bézier 曲线(母线)。使 v 成为变量, 当 v 从 0 到 1 变化的时候, 可以形成一个曲面。此曲面就是所要得到的曲面。当曲面拟合出来之后, 在 z 轴方向上, 以一定步距为分

隔,将曲面投影到 xy 平面上,即可得到所需要
的等高线图。本文利用 Matlab 系统编程实现等
高线图形的生成。

3 数值验证

3.1 理论抛物面

现选取双曲抛物面为例,假设抛物面的数学
方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 2z \tag{8}$$

定义 $a = 1/2, b = 2$ 。取 16 个控制点为:(2,
8,4);(2,6,6);(2,4,4);(2,2,4)(4,7,5);(4,
6,7);(4,4,7);(4,3,5)(6,7,5);(6,6,7);(6,
4,7);(6,3,5);(8,8,4);(8,6,4);(8,4,4);(8,
2,4)。应用所编程序,得出的拟合曲面如图 4 所
示。比较理论曲面与生成曲面上对应点的 z 坐标
值的大小, z 坐标值的误差值小于 4.5%。拟合
曲面的等高线图如图 5 所示,与理论等高线的误

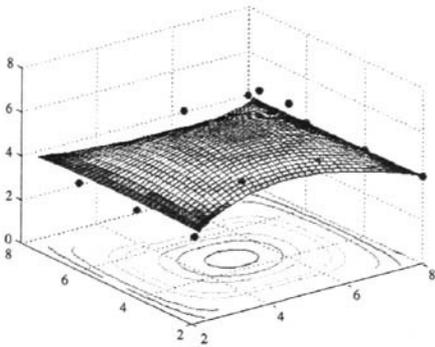


图 4 双曲抛物面图
Fig.4 The double parabolic surface

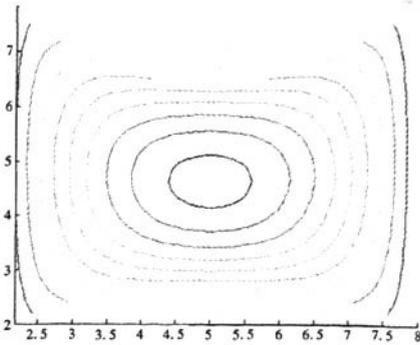


图 5 拟合双曲抛物面的等高线图
Fig.5 The contour figure of fitting parabolic surface
差小于 5%。

3.2 飞机翼面

给出飞机翼面上的 16 个坐标点如下:(2,1,
0.97);(2,2,1);(2,3,0.5);(2,4,0.5);(4,4,
3.5);(4,6,2.875);(4,8,2);(4,10,0.875);
(6,4,8.5);(6,8,7);(6,12,4.5);(6,16,1);
(8,4,15.5);(8,8,14);(8,12,11.5);(8,16,
8)。

应用所编程序,拟合出的曲面片及相应的等
高线图,分别如图 6,7 所示。

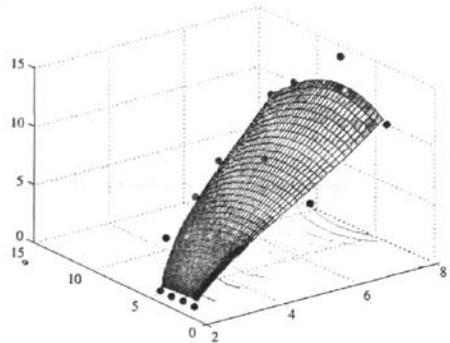


图 6 拟合翼面
Fig.6 The fitting wing surface

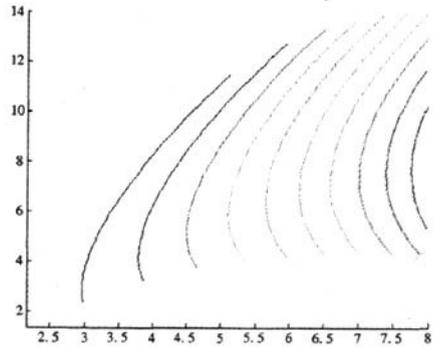


图 7 拟合翼面的等高线图
Fig.7 The contour figure of fitting wing surface

比较实际曲面与拟合曲面上对应点的 z 坐
标值的大小,误差值小于 6.5%。拟合翼面等高
线图与实际等高线对应点的误差小于 5.7%。数
值仿真表明,误差大小与翼面的复杂程度相关,
可以通过选择不同的控制点达到较好的拟合效果。

4 结语

(1)金属板材数控渐进成形技术是根据工件
形状所生成的几何信息,用三轴数控设备控制成

形工具头沿其运动轨迹对板材进行局部的塑性加工,使板材逐步成形为所需工件的柔性加工技术。该技术不需要专用模具便可加工任意形状复杂的工件,省去了设计产品过程中模具设计、制造、实验修改等复杂过程,极大降低了新产品开发的周期和成本,对于飞机等多品种小批量的产品具有重要的应用价值。

(2) 本文研究了板料渐进成形工艺中等高线图的生成方法,提出一种基于 Matlab 拟合 Bézier 曲面并快速生成等高线图的方法,可用于加工中

工具头轨迹的生成,便于得出数控加工的 G 代码。对理论抛物面和飞机翼面的仿真研究表明,本文所提出的等高线图的生成方法具有较高的工程精度,而且算法简单、计算速度快,应用到钣金渐进成形工艺中是可行的。

(3) 由于实际加工曲面的复杂性,在生成板料渐进成形工艺的等高线图时,可选择 Bézier 曲面、三次样条曲面、B 样条曲面或其它曲面分别拟合实际加工曲面,通过比较选择合适的拟合曲面,以保证板料渐进成形工艺的加工精度。

参考文献:

- [1] Yoon J W, Yang D Y, Chung K. Elasto-plastic finite element method based on incremental deformation theory and continuum based shell elements for planar anisotropic sheet materials[J]. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 1999, 174: 23-56.
- [2] 周晚林,刘骄剑. 模线图形数字化处理方法的研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, 16(1): 118-127.
- [3] Kopac J, Kampus Z. Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163(2005): 622-628.
- [4] 刘杰,莫健华,黄树槐. 金属板材分层渐进成形技术及其有限元模拟[J]. *塑性工程学报*, 2001, 8(2): 20-22.
- [5] 李明哲等. 板材多点成形过程起皱现象数值模拟研究[J]. *中国机械工程*, 1998(10): 34-38.
- [6] FARIN G. *Curve and Surface for Computer Aided Geometry Design*[M]. San Diego: Academic Press, 1988.

Study on the Method to Generate Contour Figure for Incremental Sheet Metal Forming Technology

LIU Gen-lin¹, ZHOU Wan-lin²

(1. Department of Fundamental Science Teaching, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China; 2. College of Aerospace Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China)

Abstract: The CNC incremental forming machine could process the parts of greater high level of forming limit and complex shape by applying the digital incremental sheet metal forming technology. It has wide applications for small-volume sheet metal processing in the aerospace, automotive and civilian products. The key program of the process is how to the generate contour figure of a forming part. The method to generate contour figure has been researched for incremental sheet metal forming technology. A method to generate quickly contour figure is put forward based on Bézier curved surface, the contour figures of theoretical parabolic surface and aircraft wing surface are gained by the method which are served as two samples. The results show that the contour figure method has higher engineering accuracy, the simple and faster algorithm and could be applied widely in the digital incremental sheet metal forming technology.

Keywords: incremental forming; the contour figure; Bézier Curved surface; Matlab

(责任编辑:张英健;校对:沈建新)