

引文格式: 王华毕, 魏目青, 徐旺丁. 变角度缓面零件渐进成形刀具轨迹优化 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (2): 59-63. WANG Huabi, WEI Muqing, XU Wangding. Tool path optimization for variable angle surface parts in single point incremental forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (2): 59-63.

变角度缓面零件渐进成形刀具轨迹优化

王华毕, 魏目青, 徐旺丁

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对变角度缓面零件渐进成形表面质量差的问题, 提出一种基于零件截面曲线形状用增量弧长 S_0 来控制增量步长 Δz 的方法, 并建立了 Δz 与 S_0 之间的数学方程。以变角度缓面零件为例实验验证了该方法的可行性并分析了变角度缓面零件渐进成形存在的表面质量问题及原因。实验对比研究了该方法与传统加工方法在零件表面波纹、成形尺寸误差、成形时间等方面的区别, 实验结果表明: 该方法不仅能够提高成形效率还能有效改善曲面零件渐进成形后的表面质量。

关键词: 板料成形; 渐进成形; 刀具轨迹优化; 增量步长; 表面质量; 成形尺寸误差; 表面波纹; 成形时间

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2017) 02-0059-05

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2017.02.010

Tool path optimization for variable angle surface parts in single point incremental forming

WANG Hua-bi, WEI Mu-qing, XU Wang-ding

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Poor surface quality is a main defect for variable angle surface parts in single point incremental forming. A method that the incremental step depth Δz was controlled by incremental arc length S_0 based on the section curve shape of the part was put forward, and a mathematical equation was built between Δz and S_0 . The feasibility of the method was proved by actual experiment of variable angle surface parts, and the surface quality problems and their reasons of variable angle surface parts were discussed. The difference between the above method and traditional method was compared through experiment about surface waviness, forming dimension error and forming time etc. Results show that the forming efficiency and the surface quality of curved surface parts after incremental forming are improved efficiently.

Key words: sheet forming; incremental forming; tool path optimization; incremental step depth; surface quality; forming dimension error; surface waviness; forming time

引 言

板料数控渐进成形技术是一种新型的金属板料塑性成形技术, 该技术采用夹装在数控机床上的简单成形工具, 按照预先设定的轨迹对板料进行逐层局部加工成形, 通过局部变形的不断积累而达到所需形状, 具有加工方式灵活、生产成本低及生产周期短等优点, 非常适用于新产品的开发和零件小批量生产^[1-5]。

零件表面质量不仅决定产品的美观还直接影响

产品的正常使用。复杂零件表面通常是曲面, 零件的成形角度是不断变化的。曲面零件成形时, 希望在成形角度较小的地方, 每层进给量越小越好, 从而提高零件表面质量, 在成形角度较大的地方, 增大进给量从而减小加工时间^[6], 而采用传统固定增量步长的方法成形曲面零件时, 在平缓曲面处和陡峭曲面的成形质量差别很大, 平缓曲面处留下明显的加工痕迹而且在零件平缓处成形精度较差。图 1 为采用固定增量步长的方法成形出的曲面零件, 图中 (圆圈区域) 可以看出, 曲面零件表面越平缓, 表面波纹越明显; 零件平缓处实际成形轮廓与理想

通讯作者: 魏目青, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要从事板料成形研究, E-mail: 1146348482@qq.com

作者简介: 王华毕, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事板料成形研究, E-mail: wunghb@126.com

收稿日期: 2016-05-16; 修订日期: 2016-10-12

轮廓不符,产生精度误差。通过采用较小的增量步长能减轻曲面零件表面成形缺陷但会大大增加成形时间,降低成形效率。此外,采用恒定残余波峰高度^[7-8]的方法成形曲面零件也能有效改善零件表面质量但零件成形时间也会大大增加。崔震等^[9]采用双点渐进成形出复杂的人脸模型但在成形角度小的平缓曲面处表面质量不高。史晓帆^[10]采用双点渐进成形方法成形出球形曲面零件,在零件表面平缓处加工痕迹明显且顶部圆弧形表面变得平直,成形精度较差。Attanasio A 等^[11]通过设定残余波峰高度生成成形轨迹,双点渐进成形出车门把手处曲面零件。

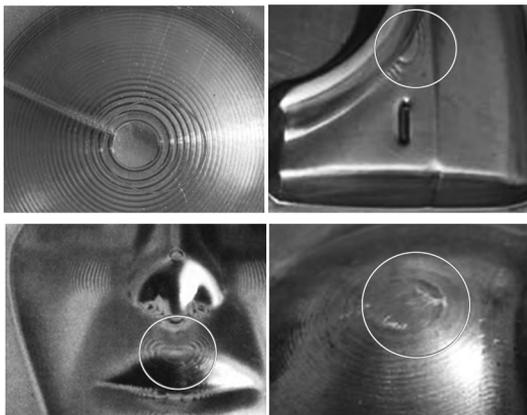


图 1 采用固定增量步长法成形的曲面零件表面图

Fig. 1 Surface quality of curved parts formed by using fixed incremental step method

本文提出一种基于零件截面曲线形状用增量弧长 S_0 来控制增量步长 Δz 的方法,该方法根据零件截面曲线的形状,在成形角度变化时自动调整增量步长,不仅能够提高成形效率还能有效改善曲面零件渐进成形后的表面质量,提高零件平缓处的成形精度。

1 原理说明

本文提出的方法原理图如图 2 所示。

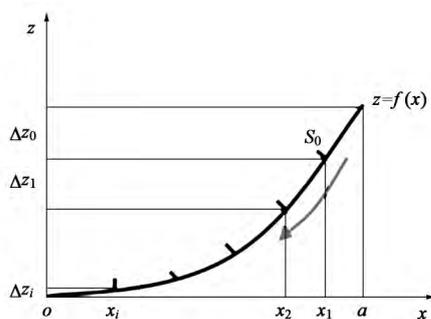


图 2 方法原理图

Fig. 2 Principle of the method

已知截面曲线总弧长为 S , 零件截面曲线方程 $z=f(x)$, 令每小段增量弧长为 S_0 , 则需要加工层数 n 为:

$$n = \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

由弧长公式求各点横坐标为:

$$\int_0^{x_1} \sqrt{1+f'^2(x)} dx = S - S_0 \Rightarrow x_1$$

$$\int_0^{x_2} \sqrt{1+f'^2(x)} dx = S - 2 \times S_0 \Rightarrow x_2 \quad (2)$$

...

$$\int_0^{x_i} \sqrt{1+f'^2(x)} dx = S - i \cdot S_0 \Rightarrow x_i$$

式中: $i=1, 2, \dots, n-1$ 。

根据曲线方程求各点纵坐标:

$$z_0 = f(x_0) = f(a)$$

$$z_1 = f(x_1)$$

$$\dots$$

$$z_i = f(x_i)$$

$$z_{i+1} = f(x_{i+1}) \quad (3)$$

则每层的增量步长为:

$$\Delta z_0 = z_0 - z_1$$

$$\Delta z_1 = z_1 - z_2$$

$$\dots$$

$$\Delta z_{i-1} = z_{i-1} - z_i$$

$$\Delta z_i = z_i - f(0) \quad (4)$$

由以上公式可得,增量步长 Δz 只和增量弧长 S_0 有关,且随着曲线斜率的变化自动调节大小,即在成形角度较大的地方 Δz 值较大,成形角度较小的地方 Δz 值较小。

对于非旋转或者非对称类零件可选其重要表面的截面曲线作为母线。

2 试验验证

为了验证该方法的可行性,结合实际加工条件,本文选择加工具有代表意义的截面曲线(母线)为一般二次曲线的零件进行验证,零件截面曲线尺寸如图 3 所示。

试验设备采用南京航空航天大学研制的 JBT5040 渐进成形数控机床,圆形成形工具头直径为 $\Phi 10$ mm。试验材料为 1060 铝板,板胚尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,板厚为 0.8 mm。

试验安排如表 1 所示。其中,试验 1-1、1-2 为传统固定增量步长加工方案,试验 1-3、1-4、1-5 为本文提到的增量弧长加工方案。

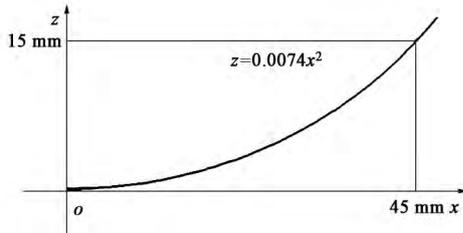


图 3 零件母线尺寸图

Fig. 3 Section curve of the part

表 1 试验加工方案

Tab. 1 Experimental program

试验编号	增量步长/mm	备注
1-1	$\Delta z = 0.5$	
1-2	$\Delta z = 0.3$	进给速度
1-3	$S_0 = 1.604$	$F = 2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
1-4	$S_0 = 1.203$	润滑油: 机油
1-5	$S_0 = 0.962$	

图 3 所示曲线总弧长 $S = 48.1343 \text{ mm}$, 成形深度 $L = 15 \text{ mm}$ 。由表 1 可得, 试验 1-1 加工层数 $n = \frac{L}{\Delta z} = \frac{15}{0.5} = 30$, 试验 1-2 加工层数 $n = \frac{L}{\Delta z} = \frac{15}{0.3} = 50$, 试验 1-3 加工层数 $n = \frac{S}{S_0} = \frac{48.1343}{1.604} = 30$, 试验 1-4 加工层数 $n = \frac{S}{S_0} = \frac{48.1343}{1.203} = 40$, 试验 1-5 加工层数 $n = \frac{S}{S_0} = \frac{48.1343}{0.962} = 50$ 。

3 结果与分析

曲面零件成形角度是不断变化的, 采用传统固定增量步长方法单点渐进成形该类零件时, 增量步长不能随着成形角度的变化调整大小, 零件存在表面质量差、平缓区域成形不充分、成形效率低等问题。

3.1 表面波纹

图 4 为表面波纹的原理图, 零件表面波纹跟增

量步长 Δz 和零件成形角度 θ 有关。如图 4a 所示, 零件成形角度一定时, Δz 越大, 波纹越明显, Δz 越小, 波纹越不明显; 如图 4b 所示, 增量步长 Δz 一定时, 成形角度大的地方, 表面波纹不明显, 成形角度小的地方, 表面波纹明显。

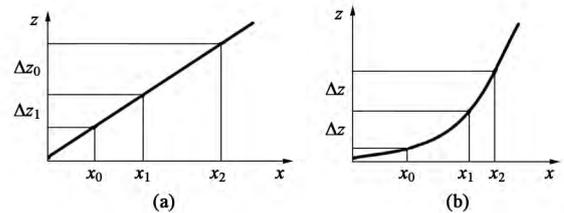


图 4 表面波纹原理图

(a) 不同增量步长 Δz (b) 不同成形角度 θ

Fig. 4 Principle of surface waviness

(a) Different Δz values (b) Different θ values

实验完成后零件表面波纹如图 5 所示。由图可知, 试验 1-1 中, 固定增量步长 $\Delta z = 0.5 \text{ mm}$, 加工的零件表面波纹最差, 随着加工深度的增加波纹越来越明显, 相邻刀轨间的痕迹距离越来越大, 在接近零件底部的位置波纹最大, 测量零件两波纹间最大距离为 4 mm ; 试验 1-2 中, 靠近零件底部固定增量步长 $\Delta z = 0.3 \text{ mm}$, 加工出来的零件表面波纹较试验 1-1 有所改善, 但在零件底部也能够观察到明显的波纹, 测量零件两波纹间最大距离为 3 mm ; 试验 1-3 中, 增量步长 Δz 是变化的, 且越靠近零件底部增量步长越小, 加工此零件时最底层增量步长 $\Delta z = 0.0152 \text{ mm}$, 加工出来的零件表面波纹均匀, 测量零件两波纹间最大距离为 0.8 mm ; 试验 1-4 中, 加工零件时最底层增量步长 $\Delta z = 0.0151 \text{ mm}$, 零件表面波纹均匀且细密, 表面质量较试验 1-3 有所改善, 测量零件两波纹间最大距离为 0.8 mm ; 试验 1-5 中, 加工零件时最底层增量步长 $\Delta z = 0.01 \text{ mm}$, 零件表面波纹均匀且更加细密, 表面质量较试验 1-4 又有所改善, 测量零件两波纹间最大距离为 0.7 mm 。

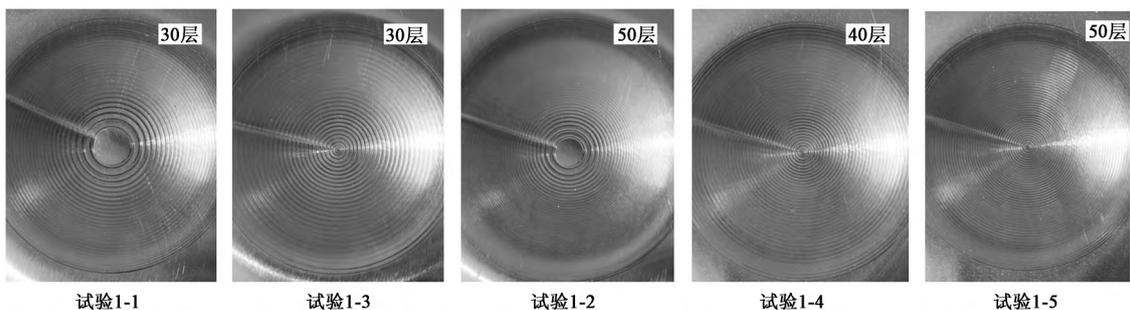


图 5 零件成形图

Fig. 5 Formed parts

3.2 零件底部成形质量和尺寸精度

变角度缓面零件成形时，在零件曲面平缓处会形成一定的未被加工区域（图 1），该区域的存在使本应是圆弧形状的曲面变得平直，大大影响了零件外形美观及成形尺寸精度。

零件未成形圆形区域的大小主要与底部增量步长 Δz 有关，底部增量步长 Δz 越小，圆形区域面积越小。如图 6 所示，成形工具加工完上一层后由进刀点 A_{i-1} 沿轮廓向最后一层进刀（进给量 Δz ），当到达点 A_i 时完成进刀，理论上成形工具从点 A_i 开始对最后一层板料挤压变形，因为点 A_i 为零件轮廓最底部顶点，则最后一层需要成形的区域仅有点 A_i ，因此当成形工具完成进刀时也就完成了对最后一层的加工，且成形工具与板料接触方式为点接触，所以板料进行最后一层加工时仅仅因进刀在金属板上留下一道浅浅的印记，并不会使板件变形，板件底部出现圆形平直或者近似平直区域。

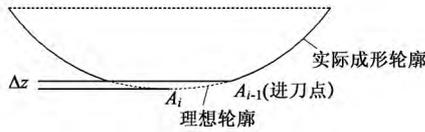


图 6 增量步长 Δz 对底部未成形区域的影响

Fig. 6 Influence of incremental step depth Δz on the unformed bottom area

零件底部形状如图 5 所示，测量零件底部圆形区域直径得到数据如图 7 所示。其中，试验 1-1 中，底部增量步长 $\Delta z = 0.5$ mm，得到的零件底部圆形区域最大，其直径可达 $\Phi 16$ mm。试验 1-2 中，底部增量步长 $\Delta z = 0.3$ mm，得到的零件底部圆形区域直径为 $\Phi 12.5$ mm。试验 1-3、1-4、1-5 中，底部增量步长 Δz 都在 0.01mm 左右，未成形的底部圆形区域直径在 $\Phi 1$ mm 左右。

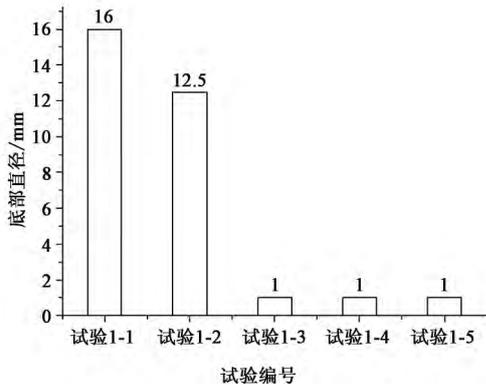


图 7 零件底部直径图

Fig. 7 Bottom diameter of the parts

分析可知，圆形未成形区域的存在不仅影响零件美观还会使成形零件在垂直方向上的尺寸误差增加。测量各试验方案加工后的零件，得到如图 8 所示的垂直方向尺寸误差图。由图可知，本方法成形出来的零件垂直尺寸误差有明显减小；因为弹性回弹等因素导致实际误差值跟理论误差值并不相同，试验 1-1 误差值最大，测量值为 0.48 mm，试验 1-5 误差值最小，测量值为 0.1 mm。

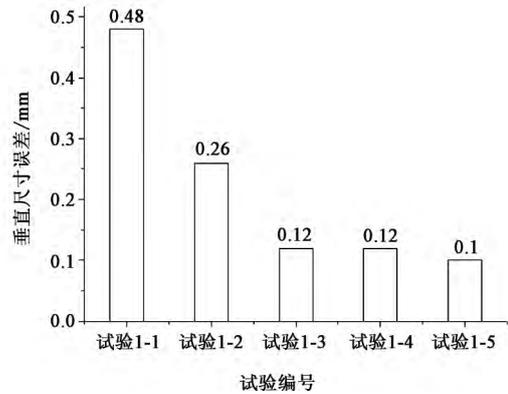


图 8 垂直方向尺寸误差

Fig. 8 Size error in the vertical direction

3.3 成形时间

金属板件渐进成形时间越短说明成形效率越高。在机床进给速度一定的条件下，加工时间跟工具头走过的路径成正比，且随着成形深度的增加，刀具在每一层所走的路径长度逐渐减小。变角度缓面零件渐进成形时，为了得到表面质量较好的零件，在成形角度较小的地方通常采用较小的增量步长，但这样会大大增加成形时间，降低成形效率。各试验所用时间如图 9 所示，由图可知加工层数相同的情况下，本文提出的方法成形时间相对较少，成形效率较高。试验 1-1、1-3 加工层数都是 30 层，但试验 1-3 比试验 1-1 成形效率提高 19%；试验 1-2、1-5 加工层数都是 50 层，但试验 1-5 比试验 1-2 成形效率提高 22%；试验 1-4 加工层数比试验 1-2 少 10 层，但成形时间比实验 1-2 少 37.5%，且表面质量较试验 1-2 有明显改善（图 5）。由此可知，本文提出的方法能根据零件截面曲线的形状，在成形角度变化时自动调整增量步长，达到优化刀具轨迹路径，提高成形效率的效果。

4 结 论

(1) 板料数控渐进成形技术是一种新型的板料

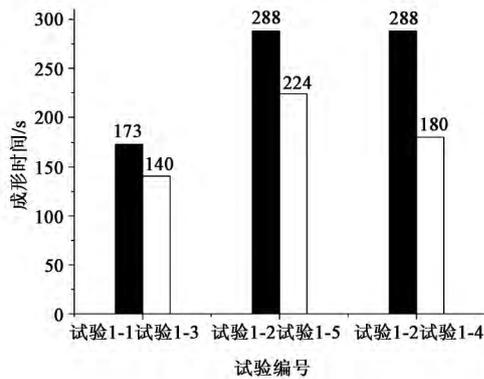


图9 成形时间图

Fig. 9 Forming time diagram

塑性成形技术。变角度缓面零件渐进成形时, 如果采用固定增量步长的加工方式, 会在成形角度较小处得不到表面质量较好的零件表面, 而较小的增量步长虽然能改善零件表面质量但会大大增加成形时间, 降低成形效率。

(2) 基于增量弧长 S_0 的增量步长控制方法能根据零件截面曲线的形状自动调整增量步长的大小, 即零件成形角度越小, 每层进给量越小, 从而使零件的表面质量提高; 零件成形角度越大, 每层进给量越大, 从而缩短成形时间, 提高成形效率。

(3) 试验对比研究表明该方法不仅能够提高成形效率还能有效改善变角度曲面零件渐进成形后的表面质量, 使曲面零件表面波纹更加均匀, 外观更加美观, 减小零件垂直尺寸误差。

(4) 基于本方法生成的增量步长需要手动输入到三维软件中去进而生成加工程序, 操作起来费时费力, 下一步改进将通过二次开发将生成的增量步长直接导入到三维软件中去。

参考文献:

- [1] JESWIET J, MICARI F, HIRT G, et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2005, 54 (2): 88-114.
- [2] SILVAI M B, MARTINS P A F. Two-point incremental forming

with partial die: theory and experimentation [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22: 1018-1027.

- [3] MIRNIA M J, MOLLAEI DARIANI B. Analysis of incremental sheetmetal forming using the upper-bound approach [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226: 1309-1320.
- [4] 莫建华, 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.
- [5] AZAOUZI M, LEBAAL N. Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, 24: 49-58.
- [6] 徐岩, 何思阳, 高霖, 等. 复杂钣金零件渐进成形表面质量影响因素 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41 (5): 559-563.
XU Yan, HE Siyang, GAO Lin, et al. Influencing factors of surface quality for complicated sheet parts by incremental forming method [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 41 (5): 559-563.
- [7] MALHOTRA R, REDDY N, CAO J. Automatic 3D spiral toolpath generation for single point incremental forming [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132: 061003.
- [8] 宋修成, 陆彬, 陈军, 等. 板料渐进成形表面质量的影响因素分析 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49 (8): 84-89.
SONG Xiucheng, LU Bin, CHEN Jun, et al. Influencing factor analysis on the surface quality of incremental forming parts [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49 (8): 84-89.
- [9] 崔震, 高霖, 陆启建. 复杂钣金零件渐进成形方法 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43 (12): 235-239.
CUI Zhen, GAO Lin, LU Qijian. Incremental forming methods on complicated sheet parts [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43 (12): 235-239.
- [10] 史晓帆. 金属板料渐进成形精度控制技术 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
SHI Xiaofan. Research on accuracy control technology in incremental sheet metal forming [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [11] ATTANASIO A, CERETTI E, GIARDINI C. Optimization of tool path in two points incremental forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177: 409-412.