

基于数控编程的渐进成形模拟复杂刀路构建方法

Method to Generate Complex Tool Path in Numerical Simulation of Single Point Incremental Forming Based on NC Programming

南京航空航天大学机电学院 史晓帆 高霖 徐岩

[摘要] 复杂刀路的构建是金属板料渐进成形的数值模拟中的难点。针对此问题,提出了一种基于数控编程技术的刀路加载方法,可简单方便的在有限元模拟中实现复杂轨迹运动控制。根据该方法的基本思想,编写了渐进成形数值模拟中复杂刀路加载软件,并在 ABAQUS 软件中成功将该方法实现。

关键词: 渐进成形 数值模拟 复杂刀路 空间运动

[ABSTRACT] Generating complex tool paths is a difficult point in the numerical simulation of single point incremental forming. A new method to load the complex tool path to the FEA software package is proposed. A software package is also compiled to realize the method and load the tool path information to ABAQUS 6.8.

Keywords: Single point incremental forming Numerical simulation Complex tool path Space movement

金属板料数控渐进成形技术是一种适用于单件、小批量钣金零件生产的新技术^[1-3]。其实现方式非常简单,将普通数控铣床上的铣刀换为成形工具头,让其在数控系统的控制下按照等高线轨迹运动,逐层将零件成形。该方法省去了高昂的模具制造费用,并在钣金零件生产中实现了数字化、信息化,大大降低了新产品的试制成本,缩短了研发周期。由于目前在生产实际中,人们对样品、概念产品需求的不断提高,有关渐进成形研究的重要性日渐凸显。

在众多研究成果中,渐进成形的有限元仿真是长期以来比较难以解决的问题。主要原因为有限元软件中难以实现对成形工具头复杂运动轨迹的控制。文献[4-5]中涉及到的零件形状多为简单的圆锥形或金字塔形零件,由于形状简单,刀路可以由人工计算的方法得到,但当形状复杂时,该方法几乎无法实现。南京航空航天大学李泷泉采用虚拟靠模导向的方法,成功模拟出形状复杂的零件^[6]。该方法需要在工具头上施加一向心力,并设置一个转动中心,当零件截面为复连通区

域时,该方法不易实现对抬刀动作的模拟。同时,该方法步骤较为复杂,有限元模型不易建立。

针对以上问题,本文提出了一种简单易行,且可以准确控制工具头运动的刀路生成方法。该方法借鉴数控技术中“直线插补”的思想,将复杂的刀路曲线离散成若干长度极小的直线段,控制成形工具头按照预定轨迹运行。

1 理论基础

1.1 基本思想

零件的轮廓往往是多种多样的,其中可能存在直线、圆弧或任意形状的样条曲线。数控机床在实现复杂刀路的走刀时,会采用插补的方式去逼近实际轮廓。所谓直线插补,就是将复杂的刀路离散成一系列微小的直线段,如果每一条直线段的长度非常小,就可以将其形成的折线看作要逼近的曲线。

当前市场上的商业有限元软件中,钣金模拟模块中往往只能实现冲头及压边圈的上下运动,不易实现复杂运动的控制。在渐进成形中,零件的形状多种多样,刀路的构成也极为复杂,常规的方法难以实现对复杂运动路径的加载。而采用微小直线段逼近的方法,可以很容易地解决这一问题。

常规的 CAD/CAM 软件中,刀轨输出中都存在“线性输出”这一设置。采用该设置输出的刀轨,其代码中只会出现直线段输出,这样便可以方便提取直线段上的节点坐标,并按照设定的运动速度进行时间节点的计算。

1.2 可行性论证

关于渐进成形的有限元模拟,在目前可以掌握的成果中,几乎全部使用了动力显式的求解方法。该方法不需要迭代求解方程,因而没有力平衡校核,计算精度较低,但计算稳定,计算成本较低。相比之下,静态隐式算法通过迭代的方法求解非线性有限元方程,虽然精度较高,但由于该方法不仅运算成本较高,而且计算非常不稳定,常常会在计算过程中因为不收敛而终止运算,在复杂接触的情况下更是难以收敛,故该方法不适合渐进

成形的有限元模拟。由于本方法只涉及到对成形工具头运动轨迹的计算和控制,对材料的变形没有过高的精度要求,故动力显式求解方法非常适合使用本方法建立的有限元模型。

动力显式算法的稳定运算是有条件的,其计算的最大时间步长必须小于许用值^[7],即:

$$\Delta t \leq \frac{L_e}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}, \quad (1)$$

式中, L_e 为最小单元的特征长度; E 为材料的弹性模量; ρ 为材料密度。

以使用铝合金材料为例,其弹性模量为 70GPa,密度为 $2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$,最小单元的特征长度取 0.5mm。按照式(1)计算,许用最大时间步长为 $3.1 \times 10^{-7} \text{s}$ 。而在有限元模拟中,成形工具头的运行速度一般为 10m/s,逼近直线的长度可以由 CAM 程序计算得出,也可以人工设置,但一般不会小于 0.05mm。可见,在仿真中工具头参考点通过每条直线段所用的时间至少为 $5 \times 10^{-6} \text{s}$,远大于计算得到的许用最大时间步长。因此,工具头在每一条微小直线段上的运行过程都得到了充足的时间步长来进行计算,保证了计算的精度和稳定性。

2 模型构建

2.1 刀路加载

图 1 为在有限元模型中加载刀路的基本流程。由于数据的来源为数控代码,该方法理论上可以实现任何复杂刀路的加载。

数控代码采用“线性输出”。这种类型的代码中,不会出现 G2、G3 等圆弧插补的命令,只会存在 G0 快速定位和 G1 直线插补。因此,代码中所有的数值均为逼近折线的节点坐标。这样,不需要对刀路曲线进行离散,可以非常容易地采集到折线上各个节点的坐标数据。

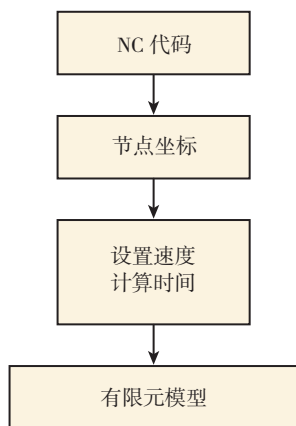


图1 刀路生成方法示意图

Fig.1 Diagram of tool path generating method

从数控代码中获取的数据为一系列有顺序的坐标点,根据相邻两点间的距离和工具头的运行速度,可计算出工具头通过每个节点的时间。至此,在有限元软件中控制复杂刀路的所有数据都已获得。

2.2 有限元模型的建立

由于本方法是从数控代码中获取节点数据,无需建立虚拟靠模,故与文献[6]中所述方法相比,本方法的有限元模型更容易建立,只需要建立板料模型和工具头模型。其中,工具头为解析刚体,板料模型上进行区域划分,内部的成形区域网格细化,外部的非成形区域限制其所有自由度,如图 2 所示。

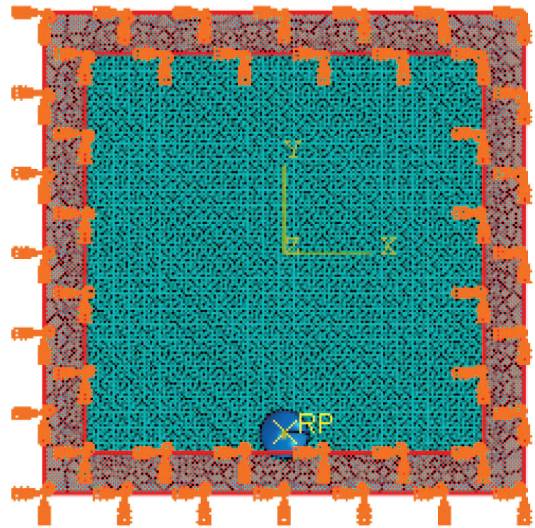


图2 有限元模型
Fig.2 FEA model

此外,在成形工具头和板料上表面之间要定义接触关系。采用主从接触方式,将成形工具头外表面定义为主面,板料上表面定义为从面。

3 方法实现与应用

使用 VC++ 对上节中所述方法进行软件编写,操作界面见图 3。该软件对 UG 3.0 所生成的 .ptp 格式数控代码文件进行坐标抽取和时间计算,生成有限元模拟软件 ABAQUS 所需要的 .inp 文件。

图 4 为使用此方法实现的复杂零件成形过程模拟的实例。该零件的 4 个侧面分别由 4 条样条曲线扫描而成,通过解析方法难以计算其节点坐标。使用上述软件,从零件的数控加工代码中提取数据,按照预定格式写入 ABAQUS 可以识别的 .inp 文件中。从数据的获取途径来看,该方法在理论上可以实现对任何形状的渐进成形制件的成形过程进行有限元模拟。

图 5 为一盒形零件仿真结果,该零件下方水平方向



图3 软件界面
Fig.3 Interface of software

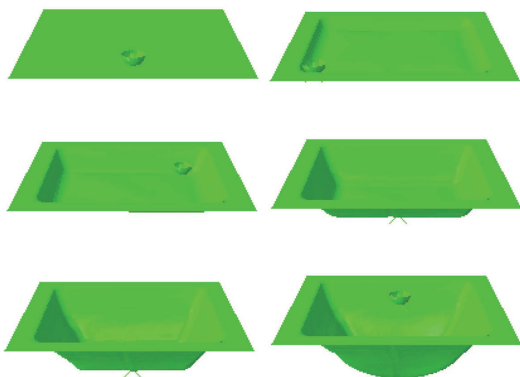


图4 模拟过程图
Fig.4 Process of simulation result

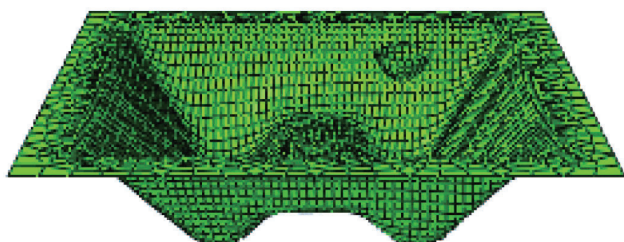


图5 带有复连通区域的零件成形过程模拟
Fig.5 Simulation of part formed by incremental forming with multiply-connected cross-sections

截面为一复连通区域,在成形时需要通过抬刀分别对两个区域进行加工,使用文献[6]中提出的虚拟靠模导向法不易实现其成形过程的模拟。由于本方法从数控代码中直接获取刀路信息,可以很容易地将实际成形时的工具头运动轨迹在有限元软件中实现。

与以往使用的方法相比,该方法大大简化了刀路载入和有限元建模的难度,并可以实现更加复杂的刀路控制,简单有效地控制了成形工具头的运动。

4 结论

基于数控编程的金属板料渐进成形复杂刀路构建方法可以非常简单方便地实现对复杂运动轨迹的控制。该方法的数据来源为CAM软件中生成的数控代码,理论上可以实现对任何形状零件渐进成形过程与任何复杂运动形式的数值模拟。由于该方法的控制对象为成形工具头的参考点,无需建立虚拟靠模等辅助模型,大大简化了有限元模型的复杂程度,减少了不必要的网格划分,降低了计算成本。该方法已经在有限元分析软件ABAQUS上进行了实现,其实用性得到了充分的证明。

参考文献

- [1] 莫健华,韩飞. 金属板材数字化渐进成形技术研究现状. 中国机械工程,2008,19(4): 491-497.
- [2] Dufloy J R, Lauwer B, Verbert J. Study on the achievable accuracy in single point incremental forming. *Advanced Methods in Material Forming*, 2007, 251-262.
- [3] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *Annals of the CIRP*, 2005, 54(2): 623-650.
- [4] Yamashita M, Gotoh M, Atsumi S Y. Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 199: 163-172.
- [5] Dejardin S, Thibaud S, Gelin J C. Experimental and numerical investigations in single point incremental sheet forming. *Materials Processing and Design*, 2007, 908: 889-894.
- [6] 李泷泉,高霖,韦红余. 金属板料渐进成形有限元仿真过程中复杂成形路径的构建方法. 机械工程学报,2006,42(6):227-230.
- [7] 王勛成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法. 北京:清华大学出版社,1997.

(责编 深蓝)

(上接第90页)

2000, 49(1): 41-46.

- [11] 肖茂华,何宁,李亮,等. 陶瓷刀具高速切削镍基高温合金沟槽磨损试验研究. 中国机械工程,2008,(10)19: 1188-1192.
- [12] 王素玉,赵军,艾兴,等. 高速切削表面粗糙度理论研究综述. 机械工程师,2004,(10): 3-6.
- [13] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理. 北京:化学工业出版社,2005.
- [14] 王素玉. 高速铣削加工表面质量的研究[D]. 济南:山东大学,2006.
- [15] Liu Weiwei, Gao Xiaojuan, Shan Chenwei, et al. Influence of cutter geometric parameters on the stability of milling process of thin-walled blades. 2010 2nd international conference on intellectual technology in industrial practice, 2010(1): 119-121.
- [16] 任军学,罗远锋,姚倡锋. TC17 钛合金高速铣削表面粗糙度及参数灵敏度研究. 航空制造技术,2009,22:78-82.
- [17] 杜随更,吕超,任军学,等. 钛合金高速铣削表面形貌及表层组织研究. 航空学报,2008,29(6):1710-1715.

(责编 亦非)