

# 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

李泷泉 高 霖 韦红余

(南京航空航天大学机电工程学院 南京 210016)

摘要：提出一种用于获得复杂空间运动轨迹的方法——虚拟靠模导向法。该方法借鉴了数控加工中 COPY 铣的思想，利用轨迹生成球在由零件派生出的虚拟靠模表面上的持续运动来模拟实际成形工具的运动过程，从而获得最终成形路径。基于该思想和简单的运动学原理，轨迹球与虚拟靠模有限元模型被构建起来。通过对计算过程进行分析，确定运用该法时适合的加载力、成形速度及计算精度的影响因素。因该法完全基于有限元模拟计算，故获得的成形路径可直接导入至后续的金属板料成形过程的模拟分析。该法已在有限元软件 PAMSTAMP 平台上得以实现，并主要用于金属板料渐进成形过程的有限元仿真。

关键词：板料 有限元法 空间运动 渐进成形

中图分类号：TG386

## 0 前言

近十几年来，有限元模拟技术在国内得到了广泛的应用，对工业产品的设计和生起到了很好的指导作用。随着技术的发展，新的制造工艺和加工方法不断涌现。为此，人们常常通过试验与有限元技术相结合的方法，对这些新工艺、新方法进行理论研究，以期获得最佳方案。然而有些新工艺因为其特殊原因，往往很难得到准确的模拟。

比如板料渐进成形技术<sup>[1-3]</sup>，在国外也称为无模成形技术。该技术只需简易模具，甚至无须模具就可以加工出形状复杂的钣金件，在快速原形制造领域有着非常好的应用前景。

然而，该技术很难进行有限元模拟。其主要原因在于：渐进成形技术是通过金属压头的空间运动使得板料发生局部塑性变形，随着局部变形的逐步积累，最终成形出所需要的形状。在此过程中金属压头有着复杂的空间运动轨迹，从而导致很难进行准确的有限元模拟。也正因为如此，该方法的有限元仿真在国外文献中几乎很少涉及<sup>[4-6]</sup>。

针对上述复杂加工路径无法在有限元计算过程中得到很好描述的问题，通过借鉴数控加工过程中 COPY 铣的思想，“虚拟靠模导向方法”被构建出来。该方法仅需利用简单的运动学原理和通用的有限元计算软件，就可以方便地得到满意的成形路

径。最终的模拟和试验结果的对比也证明该方法的有效性。

除了板料渐进成形技术的有限元仿真以外，该方法还可以用来模拟其他复杂加工过程，如板料或管子的复杂的弯曲行为等。

## 1 虚拟靠模导向法的理论背景

### 1.1 基本思想

虚拟靠模是有着和实际零件表面形状一致或类似的物体。导向工具用于生成虚拟加工所需的轨迹。

虚拟靠模的思想借鉴了数控加工中拷贝铣的概念：一导向工具紧贴在靠模表面运动，与此同时，加工铣刀在系统的控制下，以和导向工具相同的运动方式运动，从而加工出和靠模相同的零件。与之对应，“虚拟靠模导向法”利用导向工具在虚拟靠模上的运动，模拟实际工具的运动过程，通过跟踪该工具的运动轨迹，获得所需成形路径，进而将其用于成形模拟中，实现板料成形过程的仿真。

理论上，路径生成和成形模拟可以同时进行。但是在实际中，为了保证计算的快捷和稳定，路径生成计算和零件成形模拟是分开进行的。图 1 反映了该方法的基本思想。

### 1.2 有限元

“虚拟靠模导向法”是一种完全基于有限元的计算方法，因此合适的算法对结果的生成非常重要。一般来说，用于模拟准静态弹塑性问题的有限元计算方法主要分为动力显式算法和静态隐式算法<sup>[7]</sup>。

动力显式算法不需要迭代求解方程,因此计算非常方便。但是该算法为了保证计算的稳定性,其时间步长必须足够小,而且因为该过程没有迭代计算,没有力平衡的校核,所以计算精度也相对较低。静态隐式算法,通过迭代的方法求解非线性有限元方程,计算精度比较高。虽然其时间步长相对于显式算法比较大,但是常常会出现不收敛的问题,尤其是在复杂接触的情况下,收敛更是困难。

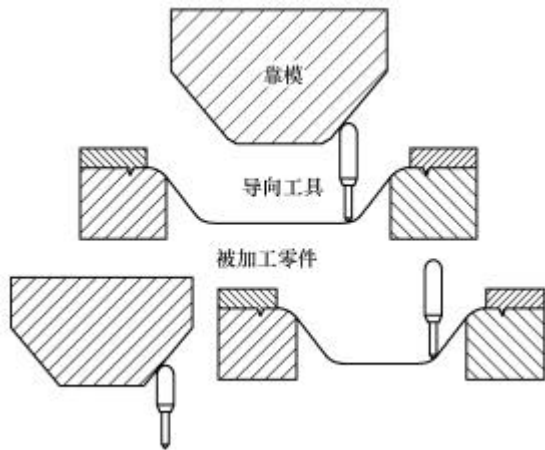


图1 虚拟靠模导向法的基本思想示意图

基于对运动轨迹精度的要求,计算的时间步长必须足够小才能有效地获得足够多的数据点来形成运动轨迹,因此,隐式算法在计算成本上明显过高。与此同时,考虑到本方法只涉及运动轨迹的计算,对变形没有要求,所以使用动力显式算法来构建“虚拟靠模导向法”的有限元模型是非常合适的。

动力显式算法是条件稳定的,即时间步长的大小直接影响到计算的稳定性,为了保证系统的稳定性,时间步长  $\Delta t$  必须满足

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{\max}} \quad (1)$$

式中  $w_{\max}$  ——系统的最高频率

通常,计算用的时间步长用下式估算

$$\Delta t_{e,s} = \frac{L_c}{\sqrt{\frac{E}{r}}} \quad (2)$$

式中  $L_c$  ——最小单元特征长度

$E$  ——弹性模量

$r$  ——材料密度

## 2 虚拟靠模导向法的模型构建

### 2.1 靠模导向法运动学模型

图2为“虚拟靠模导向法”简化的运动学模型。

导向工具贴附在靠模表面,以  $O'$  为中心进行公转。为此,导向工具承受离心力  $F_o$  的作用。为了防止导向工具脱离靠模表面,保证导向工具始终能够牢牢地贴附在模具表面,引入向心力  $F_i$ ,并将其施加在导向工具上,使其在整个过程中始终指向旋转中心  $O'$ ,动力学方程如下

$$\begin{cases} F_i = F_c + F_o \\ F_o = m w^2 R \end{cases} \quad (3)$$

式中  $F_c$  ——由  $F_o$ ,  $F_i$  产生的接触力

$m$  ——导向工具的质量

$w$  ——导向工具公转角速度

$R$  ——导向工具的公转半径

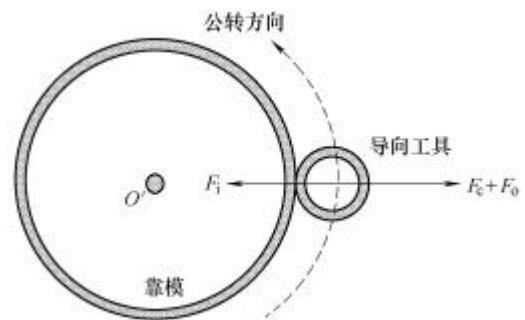


图2 动力学模型

### 2.2 向心力的作用和大小

在整个计算的过程中,出于建模方便的目的,向心力的大小始终保持恒定或者线性变化。而在计算中,导向工具的公转半径却是不断变化的,因此由式(3)可以看出离心力在整个过程中也是不断变化的。为了避免离心力足够大的时候,导向工具脱离模面,必须保证足够大的向心力,所以

$$F_i \geq F_{o,\max} \quad (4)$$

此外,工具在围绕靠模旋转时,虽然满足式(4),但是当旋转半径在很短时间内急剧变小,而向心力又不能大到足以使得导向工具始终贴附在靠模表面时,如下情况会出现:导向工具会脱离靠模表面一段时间,然后再回到靠模表面的情形。如图3,导向工具在很短的时间  $\Delta t$  内从  $A$  点移动到  $B$  点。假设在  $A$  点的旋转半径为整个模型中最大的旋转半径,即  $R_1 = R_{\max}$ ,且在此期间导向工具脱离靠模表面。为了使其在这很短时间内,迅速回落到靠模表面,结合式(3),建立如下关系

$$F_{o,\max} = m w^2 R_{\max} \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} \frac{F_i - F_o}{m} (\Delta t)^2 = \Delta L \quad \Delta L = R_1 - R_2 \quad (6)$$

由式(6),得到

$$F_i = F_o + \frac{2m\Delta L}{\Delta t^2} \quad (7)$$

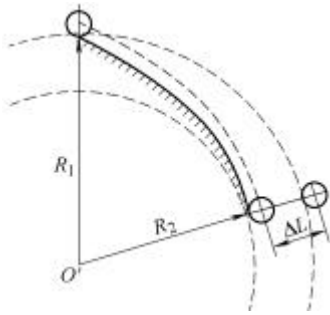


图3 导向工具在靠模表面的瞬间运动

在式(5)~(7)中,  $\Delta t$  通常和时间步长具有相同的量级, 通常在  $10^{-3}$  ms, 这样可以在最短的时间内使脱离表面的工具回到靠模表面, 而不影响计算精度。  $\Delta L$  对整个计算精度有很大影响, 其表征导向工具被允许离开接触表面的最大距离。一般情况下, 0.01 mm 的变化已经完全可以满足计算精度的要求。  $R_{max}$  对于常规金属板料有限元计算模型而言, 量级不会超过  $10^3$  mm。  $w$  通常为 1~2 rad/ms。这是因为导向工具绕模面旋转的速度对整个计算时间有着很大影响。从理论上而言其速度越快, 整个计算的时间就越短, 计算成本就越低。但实际上, 过快的速度将导致如下问题: 模面和导向工具间的接触振荡加剧, 使计算不再具有准静态计算的特征。

因为速度快, 在相同的时间内, 导向工具空间位置的采样点减少, 路径将变得粗糙。

根据上面对式(5)、(7)中各个参数的论述, 可以得到下面的经验公式

$$F_i = 10F_{o,max} \quad (8)$$

太大的向心力也要予以避免。过大的向心力也会造成类似于公转速度过大时所导致的结果。通常, 向心力为 10~100 倍的最大离心力比较合适。

### 2.3 靠模和导向工具

#### 2.3.1 变形体的确定

复杂路径的生成完全基于有限元计算, 所以计算中必须存在变形体。一般设定靠模为变形体, 导向工具为刚体。其主要原因在于仿真过程中, 靠模尺寸远远大于导向工具, 因此生成的靠模单元的最小尺寸要比导向工具的大。而在动力显式算法中单元网格越大, 计算时间步长越大, 计算的也会越低。另外, 在计算中由于靠模不允许发生变形, 因此要将靠模网格中所有位移自由度进行约束, 使得靠模无法变形, 成为准刚体。

#### 2.3.2 网格属性和计算时间

很显然, 本方法和其他有限元计算的目的是不

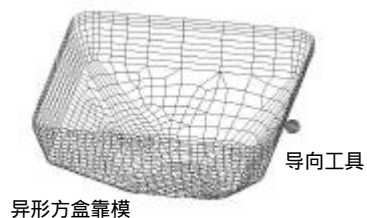
同的。在计算中, 变形体的所有自由度都被约束住, 且无须获得变形体的应力应变参数, 因此靠模的材料与计算结果无关。变形体成为了对时间步长的有效控制的工具。通过对其材料参数的修改可以有效地影响时间步长的大小, 从而达到提高计算速度, 节约计算成本的目的。根据式(2), 可知: 通过控制单元的大小, 来控制时间步长。通过减小  $E$ 、增大  $r$ , 来增大时间步长。

对于, 尽可能在划分模面网格的时候, 使生成的单元尽可能的规整, 避免畸变的网格产生, 否则将导致过小的单元特征长度。对于, 适当减小刚度、增大密度可以获得良好计算结果并节约大量计算时间, 但是过度的减小放大, 将会对接触产生不利影响。

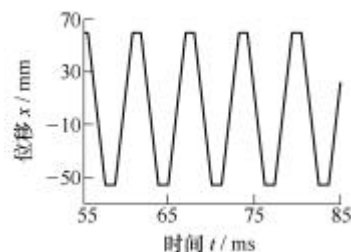
## 3 应用

该方法现在主要应用在金属板料的渐进成形仿真过程中。

图4描述了使用“虚拟靠模导向法”所生成的空间运动轨迹——导向工具(导向小球)在异形方盒靠模表面螺旋运动, 从而生成的加工球头运动所需的3D空间运动轨迹(在  $x$  方向上形成的位移时间曲线)。由该曲线可以看出这种空间位移是无法通过简单输入或者简单公式来准确描述的, 而“虚拟靠模导向法”却很好地解决了这个问题。



(a) 异形方盒模型



(b)  $x$  方向上的位移时间曲线

图4 空间运动轨迹图

图5中由上到下, 从左至右描述了一个盆形件的渐进成形仿真过程: 球头在板料表面运动, 使得板料变形, 从而最终成形出盆形件。仿真过程中的加工球头的运动轨迹正是通过“虚拟靠模导向法”

来获得的。该方法由于基于有限元计算,因此得到的数据可以直接用于后继的成形计算,而无须任何额外处理,使得整个过程变得更加方便、有效。

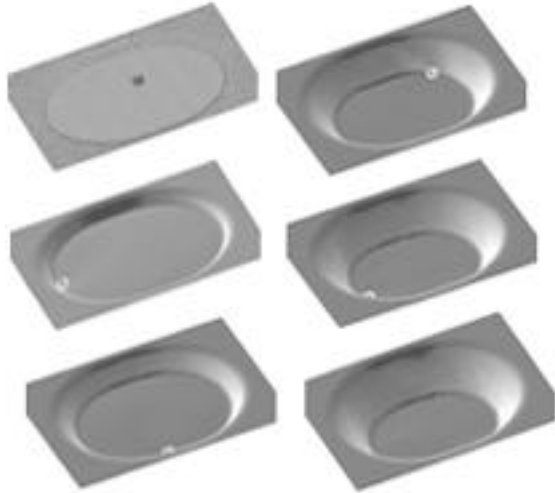


图 5 仿真过程图

#### 4 结论

虚拟靠模导向法是一种生成有限元仿真中所需的复杂空间运动路径的有效方法。该方法完全基于有限元模拟计算,从而使得其计算结果和后续的实际仿真可以做到无缝结合,即计算所得的路径数据无须任何额外处理就可以直接用于成形计算。该方法已在有限元软件 PAMSTAMP 得到实现。在金属板料渐进成形的有限元仿真中,其有效性得到了充分的证明。

#### 参 考 文 献

- [1] ISEKI H. An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller[J]. Journal of Material Technology, 2001, 111 : 150-154.
- [2] KIM Y H, PARK J J. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002(130-131) : 42-46.
- [3] SHIM M S, PARK J J. The formability of aluminum sheet in incremental forming[J]. Journal of Material Processing Technology, 2001,113 : 654-658.
- [4] ELISABETTA C, CLAUDIO G, ALDO A. Experimental and simulative results in sheet incremental forming ON CNC machines[J]. Journal of Material Processing Technology. 2004, 152 : 176-184.
- [5] YOSHIHARA S, DONALD B M, HASEGAWA, T. Design improvement of spin forming of magnesium alloy tubes using finite element[J]. Journal of Material Processing Technology, 2004,153 : 816-820.
- [6] ZHONG Yicai, MING Zheli. Finite element simulation of multi-point sheet forming process based on implicit scheme [J]. Journal of Material Processing Technology, 2005, 161 : 449-452.
- [7] 余庆华, 郑莹, 董湘怀, 等. 板料成形动力显式有限元模拟[J]. 塑性工程学报, 1999, 6(4) : 28-32.

### METHOD ON GENERATING COMPLEX LOADING PATH FOR FEM SIMULATION OF INCREMENTAL SHEET METAL FORMING PROCESS

LI Shuanggao GAO Lin WEI Hongyu

(College of Mechanical & Electrical Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016)

**Abstract :** An acceptable approach to generate a 3D forming path, which is called virtual guiding model method is accomplished. The method has the similar idea with the conventional COPY mill. A track ball is forced to move continuously on a virtual guiding tool which is generated from the part to simulate the real moving process of the forming tool. Based on the idea and the simple principle of kinematics, the FEM model of the track ball and the virtual guiding tool is constructed. Through the analysis of the computing process, the suitable loading force and forming velocity are ascertained, and the influence factors of the computing precision are also discussed. Because the method is based on FEM simulation completely, the generated forming path can be used directly for the subsequent metal blank forming process. This method is realized in the FEM software PAM-STAMP and mainly used in the simulation of the sheet metal incremental forming process.

**Key words :** Blank sheet FEM  
Space movement  
Incremental forming

作者简介:李泷泉,男,1978年出生,博士研究生。主要研究方向为板材塑性加工新技术。

E-mail : lishuanggao@126.com