

基于真实工艺参数数值模型的动力显式算法

杜 亭 谢邵辉 许江平 章志兵 柳玉起

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉, 430074

摘要:传统动力显式算法将拉深筋阻力、摩擦力等工艺参数所引起的约束阻力作为主动力进行处理, 无法反映约束阻力的真实作用效果。针对该问题, 通过采用弹簧单元提出了基于真实工艺参数的动力显式算法, 该算法可以更加精确地反映实际成形过程中工艺参数所引起的约束阻力的同步、被动产生的效果, 提高动力显式算法的计算精度。将提出的算法引入自主开发的板料成形模拟软件 FASTAMP, 计算了 Numisheet 2005 标准考题的成形过程, 计算结果与实验数据比较接近, 验证了算法的有效性。

关键词:板材成形; 弹簧单元; 工艺参数; 约束处理; FASTAMP

中图分类号: TG386; TP391.9

文章编号: 1004—132X(2009)19—2378—04

A New Process Numerical Model for Dynamic Explicit Incremental Method

Du Ting Xie Shaohui Xu Jiangping Zhang Zhibing Liu Yuqi

State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould

Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: The constrain resistance force caused by drawbead and friction is always treated as active force, that can not simulate the real effect in stamping process. A new technique of constraint resistance treatment by means of linear elastic spring element model was proposed based on the dynamic explicit incremental method, which can be applied to build more accurate model of process parameters such as blank holding force, drawbead and friction, to reflect the effect of the process parameters actually generated synchronously and passively. The simulation results of Numisheet 2005 decklid are compared with experimental ones, which verifies the efficiency of the new treatment method.

Key words: sheet metal forming; elastic spring element model; process condition; constraint treatment; FASTAMP

0 引言

板料成形过程是一个大变形的非线性力学过程, 在冲压成形有限元仿真方法中主要包括三种求解方法: 静力隐式、静力显式和动力显式。与其他算法相比, 动力显式算法由于其有限元计算方程显式化, 故避免了平衡迭代, 而且还可以通过集中质量矩阵避免求解联立方程组, 计算效率大为提高, 加上占用内存少、程序编制简单、易实现并行化等特点, 动力显式算法发展成为目前板料成形模拟软件中的主流算法。

由于动力显式算法最初应用于分析高速冲击下的瞬态问题(主要应用于碰撞、冲击等领域), 而板料成形实质上是准静态问题, 因此应用于板料成形数值分析时, 需要引入人为控制参数。而板料冲压成形中的工艺参数如压边力、拉深筋、摩擦

润滑等都需要进行特殊处理, 故必须对模拟结果进行仔细的评估, 以确定结果的可靠性, 也因此导致计算结果很容易因人而异。

在冲压成形数值模拟中, 对于拉深筋和摩擦所引起的约束阻力, 通常是直接作为外力, 累加到方程的右端项, 视为主动力进行处理。而在实际成形过程中, 上述约束阻力都是被动产生、约束坯料滑动的阻力, 作用方向与坯料滑动方向相反, 实质上是被动力, 作用效果与弹簧很相似。因此, 可以将作用在坯料节点上的约束阻力等效为一定刚度的弹簧, 通过控制弹簧系数来模拟约束阻力的大小和变换。基于上述思想, 在自主开发的板料成形模拟软件 FASTAMP^[1-4] 的基础上, 采用线性弹簧单元等效板料冲压成形过程中工艺参数引起的约束阻力, 模拟了 Numisheet2005 标准考题的成形过程, 并与指定截面厚度分布的实验结果进行了比较。

收稿日期: 2008—11—11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50905066); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目

1 动力分析有限元方程

动力分析有限元方程的一般形式为^[5]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{P} - \mathbf{F} \tag{1}$$

式中, \mathbf{M} 为整体质量矩阵; \mathbf{C} 为整体阻尼矩阵; \mathbf{P} 为外力节点力列阵; \mathbf{F} 为内力节点力列阵; $\dot{\mathbf{U}}$ 、 $\ddot{\mathbf{U}}$ 分别为节点速度和加速度列阵。

通常, 动力显式积分算法采用集中质量矩阵, 即 \mathbf{M} 是一对角矩阵, 并取 $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M}$, 其中, α 为变换系数, 无物理意义。则式(1) 表示的联立方程组变成(节点数 \times 节点自由度数) 个相互独立的方程:

$$m_i \ddot{u}_i + \alpha m_i \dot{u}_i = P_i - F_i \tag{2}$$

式中, m_i 为第 i 个节点的质量; P_i 、 F_i 分别为作用在第 i 个节点上的节点外力和内力; \ddot{u}_i 、 \dot{u}_i 分别为第 i 个节点的节点加速度和节点速度。

设 t 时刻的状态为 n , t 时刻及 t 时刻之前的力学量已知, 且定义 $t - \Delta t$ 时刻的状态为 $n - 1$, $t - \frac{1}{2} \Delta t$ 时刻的状态为 $n - \frac{1}{2}$, $t + \Delta t$ 时刻的状态为 $n + 1$, $t + \frac{1}{2} \Delta t$ 时刻的状态为 $n + \frac{1}{2}$ 。设 t 时刻前后两时间增量步长不同, 即 $\Delta t_n \neq \Delta t_{n-1}$, 令 $\beta = \frac{\Delta t_n}{\Delta t_{n-1}}$, 利用中心差分算法改写动力分析有限元方程, 可得

$$\frac{2m_i}{(1+\beta)\Delta t_{n-1}}(\dot{u}_{n+1/2} - \dot{u}_{n-1/2}) + \alpha m_i (\frac{\beta}{1+\beta} \dot{u}_{n+1/2} + \frac{1}{1+\beta} \dot{u}_{n-1/2}) = P_n - F_n \tag{3}$$

2 真实工艺参数数值模型

在板料成形模拟中, 压边力(托料力)、拉深筋、润滑等都属于边界条件, 所产生的作用力均属于外力。压边力(托料力) 和润滑在计算过程中通常采用修正的库仑摩擦定律以界面摩擦力的形式进行约束处理, 压边力(托料力) 平均分配给压边圈、托料块范围内的所有节点, 并根据成形过程中节点压边反力的大小人为引入比例系数, 以考虑板料变形过程中厚度变化对压边力(托料力) 分配的影响。对拉深筋的处理方法, 通常都采用等效拉深筋来模拟真实拉深筋对板料的作用, 即用一条曲线表示真实拉深筋中心线在压料面上的位置, 将拉深筋对板料的作用转化为等效拉深筋阻力。在较多的拉深筋模型中, Stoughton^[6] 等效拉深筋阻力模型是比较复杂而完善的, 模型预测的拉深筋阻力与试验结果非常吻合, 因此本文采用 Stoughton 拉深筋模型计算等效拉深筋阻力。

在动力显式有限元算法中, 对于摩擦和等效拉深筋所引起的约束阻力, 通常是直接累加到方程的右端项, 构成了式(1) 中的 \mathbf{P} , 显然是将约束阻力作为主动力进行处理, 并没有考虑到在各个增量步之间节点运动速度和方向变换对约束阻力的影响。而在实际成形过程中, 约束阻力是被动产生、约束坯料节点滑动的阻力, 作用方向与坯料节点的滑动方向相反, 因此将作用在坯料节点上的约束阻力等效为一定刚度的弹簧, 通过控制弹簧刚度系数来模拟真实约束阻力的大小和变化。

由于采用了集中质量矩阵, 所有的约束阻力都分配在关关节点上, 如图 1 所示。设作用于节点 n_8 上的外力为 $f(t)$, 由于是被动产生的约束阻力, 因此作用方向与节点在当前时刻的运动方向相反。设当前时刻的节点位移为 $u = \dot{u} \Delta t$, 引入弹簧单元反映作用力效果, 则可得

$$f(t) = -k_{sp} \dot{u} \Delta t \tag{4}$$

若当前时刻的外力已知, 则弹簧刚度系数 k_{sp} 为

$$k_{sp} = -\frac{f(t)}{\dot{u} \Delta t} \tag{5}$$

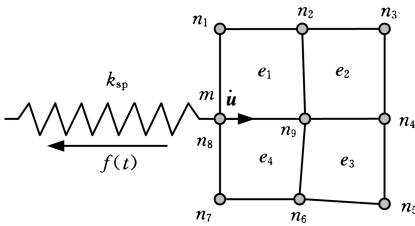


图 1 线性弹簧单元模型

因此, 式(3) 可改写为

$$\frac{2m_i}{(1+\beta)\Delta t_{n-1}}(\dot{u}_{n+1/2} - \dot{u}_{n-1/2}) + \alpha m_i (\frac{\beta}{1+\beta} \dot{u}_{n+1/2} + \frac{1}{1+\beta} \dot{u}_{n-1/2}) = k_{sp}^n u_n - F_n \tag{6}$$

式中, k_{sp}^n 为第 n 个增量步内弹簧单元的刚度系数; u_n 为第 n 个增量步的节点位移。

由中心差分格式可得第 n 个增量步的节点位移:

$$u_n = u_{n-1} + \dot{u}_{n-1/2} \Delta t_{n-1} \tag{7}$$

将式(7) 代入式(6) 整理可得

$$[\frac{2m_i}{(1+\beta)\Delta t_{n-1}} + \frac{\alpha \beta m_i}{1+\beta}] \dot{u}_{n+1/2} + [\frac{\alpha m_i}{1+\beta} - \frac{2m_i}{(1+\beta)\Delta t_{n-1}} - k_{sp}^n \Delta t_{n-1}] \dot{u}_{n-1/2} = k_{sp}^n u_{n-1} - F_n \tag{8}$$

由于节点在每个增量步的运动状态变换很小, 因此式(8) 中 $k_{sp}^n u_{n-1}$ 可近似认为是上一时间步的外力 P_{n-1} , 它在第 n 个增量步时为已知量, 因此, 式(8) 可进一步整理为

$$[\frac{2m_i}{(1+\beta)\Delta t_{n-1}} + \frac{\alpha \beta m_i}{1+\beta}] \dot{u}_{n+1/2} + [\frac{\alpha m_i}{1+\beta} - \frac{2m_i}{(1+\beta)\Delta t_{n-1}} - k_{sp}^n \Delta t_{n-1}] \dot{u}_{n-1/2} = P_{n-1} - F_n \tag{9}$$

2.1 等效拉深筋

板料成形过程模拟中,通常采用等效拉深筋阻力来考虑不同形状拉深筋对板料流动约束的作用效果,将拉深筋区域的板料受力状态简化成平面应变情况,计算出节点位移 u 与等效拉深筋阻力 F_d 的关系,如图 2 所示,其中, F_{dp} 、 k_{dp} 、 u_p 分别为 p 点的等效拉深筋阻力、斜率、位移。

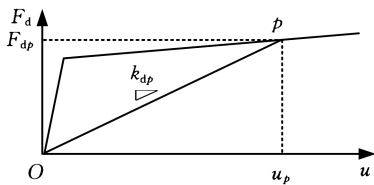


图 2 等效拉深筋数学模型

由中心差分格式可知第 n 个增量步的节点位移 $u_n = u_{n-1} + \dot{u}_{n-1/2} \Delta t_{n-1}$,即可由拉深筋阻力曲线确定该增量步的拉深筋阻力 $F_d^{(n)}$,引入弹簧单元并假设弹簧单元的刚度系数为 k_d ,则有

$$F_d^{(n)} = k_d \dot{u}_{n-1} + k_d \dot{u}_{n-1/2} \Delta t_{n-1} \tag{10}$$

由于每个增量步的增量位移很小,因此式(10)中 $k_d \dot{u}_{n-1}$ 可近似认为是上一增量步的拉深筋阻力,因此可进一步整理为

$$F_d^{(n)} = F_d^{(n-1)} + k_d \dot{u}_{n-1/2} \Delta t_{n-1} \tag{11}$$

则弹簧的刚度系数为

$$k_d = \frac{F_d^{(n)} - F_d^{(n-1)}}{\dot{u}_{n-1/2} \Delta t_{n-1}} \tag{12}$$

2.2 摩擦处理^[7]

如图 3 所示,假设 i 是一个受压的接触节点。 n 为切向滑动界面 Γ 的单位法向量; t 为在切向滑动界面 Γ 内的单位向量,是坯料节点 i 的位移方向。 $\Delta u_i^{(1)}$ 、 $\Delta u_i^{(2)}$ 、 $\Delta u_i^{(3)}$ 分别为在整体坐标系 $OX_1X_2X_3$ 下,相对于切向滑动界面 Γ ,节点 i 滑动增量位移 Δu_i 的分量;在某增量步内节点 i 在切向滑动界面 Γ 内滑动到 p 点,滑动距离为 u_{ip} ,则

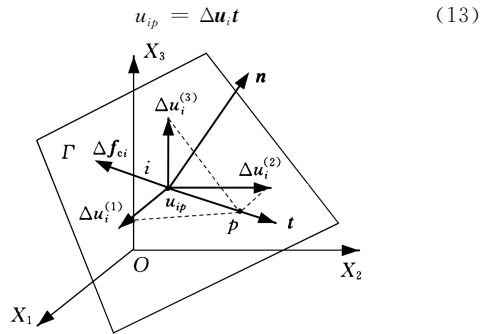


图 3 节点 i 在模具表面的滑动关系

假设在空间整体坐标系下节点 i 的位移增量为 d_i ,模具移动方向始终与 X_3 轴平行,本增量步的模具移动量为 Δh ,则

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_i^{(1)} &= d_i^{(1)} \\ \Delta u_i^{(2)} &= d_i^{(2)} \\ \Delta u_i^{(3)} &= d_i^{(3)} - \Delta h \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

式中, $d_i^{(1)}$ 、 $d_i^{(2)}$ 、 $d_i^{(3)}$ 分别为位移增量 d_i 在 X_1 轴、 X_2 轴、 X_3 轴上的位移增量分量。

采用库仑摩擦定律,节点 i 的摩擦力增量 Δf_{ci} 为

$$\Delta f_{ci} = -\mu(\Delta f_i \cdot n)t \tag{15}$$

式中, μ 为库仑摩擦因数; Δf_i 为当前增量步节点 i 的节点力增量。

由于摩擦力是被动产生的,因此,为了真实模拟这种作用效果,下面将引进弹簧单元,用弹簧单元来模拟被动摩擦力的作用效果。假设弹簧单元的刚度为 k_f ,则

$$\Delta f_{ci} = -k_f u_{ip}t \tag{16}$$

将式(13)代入式(16)可得

$$\Delta f_{ci} = -k_f(\Delta u_i \cdot t)t \tag{17}$$

利用式(15)和式(17),可近似预测弹簧单元的刚度大小,即

$$k_f = \frac{\Delta f_i \cdot n}{\Delta u_i \cdot t} \mu \tag{18}$$

3 数值模拟结果与实验结果比较

Numisheet 是目前板料成形模拟界最权威的会议,所给出的标准考题也成为考核板料成形模拟软件的重要标准。本文采用 Numisheet 2005 的行李箱内板为研究对象,计算结果的基准截面如图 4 所示^[8],零件材料牌号为 BH180,各项力学性能参数:弹性模量 $E = 207\text{GPa}$,泊松比 $\nu = 0.28$,厚向各向异性参数 $R_{0^\circ} = 1.604$ 、 $R_{45^\circ} = 1.388$ 、 $R_{90^\circ} = 1.991$,各向异性系数 $\bar{\gamma} = 1.593$,应力—应变关系为 $\bar{\sigma} = 556.19(0.001 + \bar{\epsilon})^{0.194}$,摩擦因数 $\mu = 0.125$,板厚 $h_0 = 0.8\text{mm}$ 。为减少计算量,仅取对称零件的一半进行分析,初始坯料网格为 8064,计算完成时网格数量为 96 432。

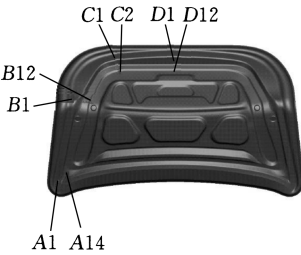


图 4 标准考题测量基准截面

沿基准截面测量获得厚度的数值模拟结果,如图 5 所示,并与实验结果^[9]进行了比较。图 6 所示分别为 A、B、C、D 4 个截面的模拟结果与实验结果的比较曲线。可以看出,4 个截面的厚度分布与实验结果的最大绝对误差不超过 0.05mm,误

差范围控制在 5% 以内,说明新的工艺参数数值模型是有效的。

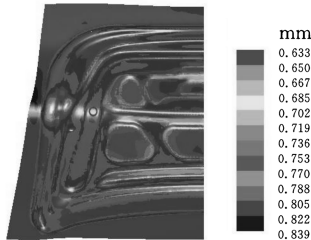
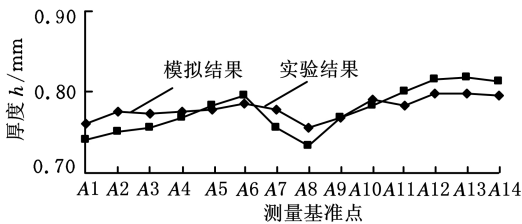
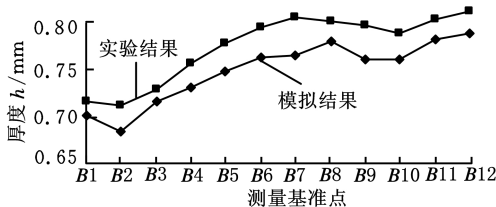


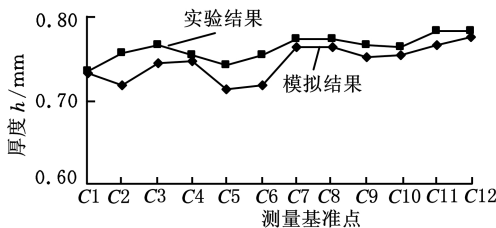
图 5 标准考题数值模拟结果(厚度)



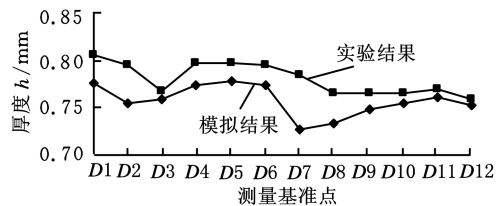
(a)A 截面



(b)B 截面



(c)C 截面



(d)D 截面

图 6 Numisheet 2005 行李箱内板
厚度分布数值模拟结果与实验结果比较

4 结论

(1)引入弹簧单元建立更为真实的工艺参数数值化模型,该模型可以精确反映工艺参数引起的拉深筋阻力、摩擦力等约束阻力在实际成形中

被动、同步产生的作用效果。

(2)将改进的工艺参数数值化模型引入动力显式算法,改写了动力显式有限元列式。

(3)通过与 Numisheet2005 行李箱内板实验结果的对比,说明新的工艺参数数值化模型处理方法是有效的。

参考文献:

- [1] Liu Y Q,Li Z G,Yan Y K. Fast Accurate Prediction of Plank Shape in Sheet Metal Forming[J]. Acta Mechanica Solida Sinica,2004,17(1):58-64.
- [2] 杜亭,柳玉起,章志兵,等. 板料成形坯料形状与应变分布的快速精确预测[J]. 中国机械工程,2005,16(20):1867-1870.
- [3] 杜亭,柳玉起,章志兵,等. 面向设计的板料成形快速仿真系统 FASTAMP[J]. 中国机械工程,2006,17(增刊):83-85.
- [4] 谢邵辉,柳玉起,杜亭. 冲压成形模拟过程中的工艺切口算法及应用[J]. 中国机械工程,2008,19(10):1205-1208.
- [5] Belytschko T,Lin J I,Tsay C S. Explicit Algorithms for Nonlinear Dynamics of Shells [J]. Comput. Methods Appl. Mesh. Engrg. ,1984,42:225-251.
- [6] Stoughton T B. Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming [C]//Proceedings of the 15th ID-DRG. Dearborn,1988:205-215.
- [7] 杜亭,柳玉起,章志兵,等. 板材冲压成形有限元数值模拟界面摩擦约束处理方法[J]. 固体力学学报,2007,28(1):67-70.
- [8] Buranathiti T,Cao J. NUMISHEET2005 Benchmark Analysis on Forming of an Automotive Deck Lid Inner Panel; Benchmark 1 [C]//NUMISHEET 2005 Conference Proceedings. Detroit, MI, 2005: 996 - 1003.
- [9] Buranathiti T,Jian Cao. Benchmark Simulation Results:Automotive Deck Lid Inner Panel(Benchmark 1) [C]//NUMISHEET 2005 Conference Proceedings. Detroit, MI,2005:919-995.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:杜 亭,男,1981 年生。华中科技大学机械科学与工程学院博士后研究人员。主要研究方向为板材冲压成形数值模拟及模具制造技术。发表论文 20 余篇。谢邵辉,男,1982 年生。华中科技大学材料科学与工程学院博士研究生。许江平,男,1980 年生。华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室博士研究生。章志兵,男,1978 年生。华中科技大学机械科学与工程学院博士后研究人员。柳玉起,男,1966 年生。华中科技大学材料科学与工程学院教授、博士研究生导师。