

薄板成形模拟中切边回弹算法

周 平¹, 郭 威², 申国哲³, 胡 平³

(1. 吉林大学 汽车工程学院,长春 130022;2. 吉林大学 材料科学与工程学院,长春 130022;3. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:为实现薄板成形切边回弹有限元数值模拟,基于冲压成形性分析软件 KMAS 平台,建立了切边回弹算法。该算法首先采用切边单元自适应模板实现了切边区域网格重构,然后以形函数插值的方式实现了新旧网格变形场量的映射,最后建立简化的线弹性卸载模型,基于静态隐式算法,预测切边回弹的影响。对于 NUMISHEET 2005 提供的国际标准测试零件(某汽车底板横梁拉延件)的切边回弹数值模拟,结果与实验结果基本一致,验证了算法的有效性。

关键词:材料合成与加工工艺;薄板成形;切边回弹;变形场量映射;线弹性卸载;静态隐式算法

中图分类号:U46; TG386 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2010)04-0931-06

Trimming springback algorithm in thin sheet forming simulation

ZHOU Ping¹, GUO Wei², SHEN Guo-zhe³, HU Ping³

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Material Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An algorithm was proposed based on KMAS sheet forming analysis platform to simulate the trimming spring back in the thin sheet forming by the finite element method. The mesh relocation in the trimming region was achieved by the self-adaptive template of trimmed element. The deformation field data mapping from the old to the new mesh was realized by interpolation of the shape function. A simplified linear elastic unloading model was built based on the static implicit algorithm to predict the effect of trimming spring back. The numerical simulation on the international standard test part, an automotive underbody stretch cross-member, which was provided by NUMISHEET 2005, was in good agreement with experimental result, validating the effectiveness of the presented algorithm.

Key words: material synthesis and processing technology; thin sheet forming; trimming springback; deformation data mapping; linear elastic unloading; static implicit algorithm

切边是复杂板材多工步成形中必不可少的工序,回弹由零件内不平衡残余应力的卸载引起,将严重影响板材的成形质量和尺寸精度,尤其是为汽车轻量化使用高强度钢板,更加剧了回弹缺陷。

回弹问题属于复杂的三重非线性问题,从 NUMISHEET 93 到 NUMISHEET 2005 国际会议的回弹计算结果可以看出,回弹模拟的准确性和收敛性一直是板材成形数值模拟的难点,因此

收稿日期:2009-04-09.

基金项目:国家杰出青年基金项目(10125208).

作者简介:周平(1983-),男,博士研究生. 研究方向:汽车车身先进设计与制造技术. E-mail:pingzhou_dr@yahoo.cn

通信作者:胡平(1956-),男,教授,博士生导师. 研究方向:车身虚拟设计与制造工程. E-mail:pinghu@dlut.edu.cn

引起了国内外学者的重视^[1-5]。切边回弹是回弹的一种,与普通回弹的主要区别在于它涉及到材料的断裂,因此普遍引入断裂理论。然而针对薄板的切边回弹,断裂理论显然是不合理的,一是体单元计算效率低,二是存在体单元与成形阶段壳单元的转换困难,因此仍然采用壳单元模型。切边回弹模拟的精度主要取决于成形模拟精度、切边处理质量和应力卸载模型三方面。在保证成形分析精度的基础上,切边回弹模拟的精度关键在于切边区域网格重构、新旧网格变形场量的映射和不平衡应力的卸载。

目前,采用 PCG 求解技术的静态隐式回弹计算最为流行,但仍存在收敛瓶颈。作者在冲压成形分析软件 KMAS 平台上,采用 BT 壳单元,实现了切边区域网格重构,完成了新旧网格变形场量的映射,建立了简化的“线弹性卸载”模型,最后采用 UMFPACK 直接求解技术的静态隐式算法,实现了切边回弹数值模拟。

1 自适应模板网格重构

1.1 基本思想

如图 1 所示,自适应模板网格重构的基本思想是通过一条或多条封闭或未封闭的切边线与有限元网格求交生成截面线,再按照自适应模板所规定的动作移动节点和拆分单元,实现切边区域网格重构。该算法首先采用分段线性切边线来模拟切刀轮廓,采用切边平面模拟切刀的运动;然后通过切边平面与网格求交生成截面线;再进行单元取舍判断,建立三种单元模式(拆分、保留和删除)和三种节点模式(交点、内部和外部);最后沿截面线路径逐个单元调用自适应模板实现切边区域网格重构。

切边线与网格的位置关系是复杂多样的,使得重构变得尤为复杂,自适应模板为内部节点规定移动原则和为拆分单元制定拆分原则。与按照

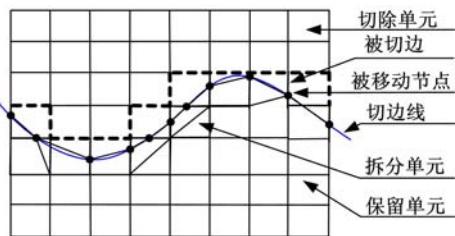


图 1 自适应模板网格重构示意图

Fig. 1 Mesh relocation based on self-adaptive template

单元号顺序执行网格重构的方法相比,沿截面线路径逐个单元调用自适应模板执行网格重构的方法更好地避免了边界锯齿、边界缝隙和单元打褶等缺陷。

1.2 自适应模板

在自适应模板中,规定以切边比作为节点沿边移动的判据,如图 2 所示。切边比定义为

$$TR = TL / EL \quad (1)$$

式中: TL 为边被切除的长度; EL 为边长。为了避免因节点移动而使单元过大或过小,取合理的最大切边比 MTR 尤为重要,通常取 0.3。

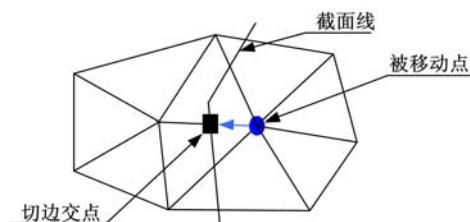


图 2 切边比节点移动示意图

Fig. 2 Relocation of nodes based on trimming ratio

根据拆分单元内、外节点数,对切边线与网格的位置关系进行分类,下面以具有 2 个内部节点和加密网格的自适应模板为例加以说明。

(1) 2 个内部节点

如图 3 所示, N_1 和 N_4 为外部节点, N_2 和 N_3 为内部节点, P_1 和 P_2 为切边交点, 截面线路径为 $\overrightarrow{P_1 P_2}$, 规定 $N_1 N_2$ 为入边, $N_3 N_4$ 为出边。HR 为入边切边比, TR 为出边切边比, 并定义 $RR = 1.0 - MTR$ 。根据切边比大小, 处理如下:

① $TR > RR$: 如图 3(a) 所示, 一般地, 将 N_3 移动到 P_2 , 并生成新单元 $P_1 N_2 N_3$ 。当 P_1 是截面线起点且 $HR > RR$ 时, 还需将 N_2 移动到 P_1 。

② $TR \leq RR \& HR > RR$: 如图 3(b) 所示, 通常只在处理首尾截面线段时出现, 需将 N_2 移动到 P_1 , 生成新节点 P_2 和新单元 $N_2 N_3 P_2$ 。

③ $TR \leq RR \& HR \leq RR$: 如图 3(c) 所示, 只需生成新节点 P_1 、 P_2 和新单元 $P_1 P_2 N_3 N_2$ 。

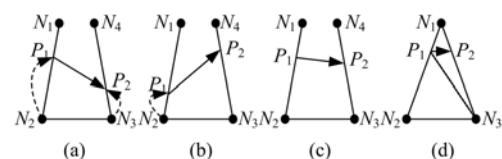


图 3 2 个内部节点的自适应模板

Fig. 3 Self-adaptive template with two inner nodes

④ $\text{TR} < \text{TR} \& \& \text{HR} < \text{TR} \& \&$ 三边形单元: 如图 3(d) 所示, 忽略切边点 P_2 , 生成新单元 $P_1 N_2 N_3$ 。

(2) 加密网格处理

随着加密网格技术的应用, 针对非加密网格的切边处理方法已不能满足需求。与非加密网格切边不同的是, 加密网格的切边需要符合加密点与其所在边之间的约束关系。如图 4(a)(b) 所示, 处于内部的加密节点被约束在所属边的中点, 因此切边时需要根据节点 N_3 和 N_5 更新加密节点 N_2 。另外, 由于加密节点的不协调性质, 还存在如图 4(c)(d) 所示的情况, 在边 $N_2 N_3$ 和边 $N_3 P_2$ 之间出现边界缝隙, 严重影响了网格质量, 通过建立此类问题的检测算法, 捆合点 P_1 和点 P_2 , 如图 4(e) 所示。

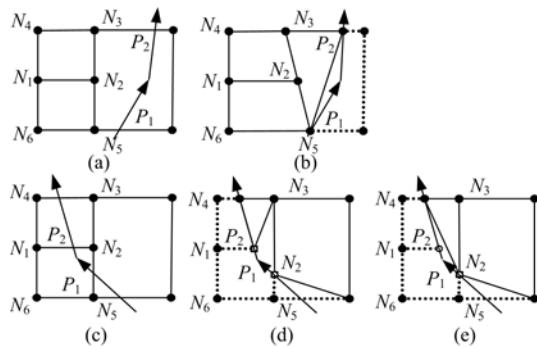


图 4 加密网格切边示意图

Fig. 4 Trimming operation with refined mesh

通过以上 2 个典型的例子简单地介绍了自适应模板网格重构算法, 当然实际问题比这复杂, 必须考虑所有切边线与网格的位置关系, 并尽量简化, 才能实现准确、稳定和快速的切边区域网格重构, 本文对此不详述。

2 新旧网格变形场量的映射

经过切边区域网格重构, 部分单元被删除, 部分单元被拆分、调整, 部分节点发生移动。为了模拟网格重构后的变形场量(如等效应变、等效应力和厚度等)分布, 需将旧网格的变形场量映射到新网格。如何保证新旧网格场量映射的准确性, 是切边回弹计算的关键之一。国内外学者在这方面也做了研究, 提出了包括面积插值、体积插值和形函数插值的等参逆变换等方法来实现场量映射^[6]。本文采取线性插值或双线性形函数插值的方式实现对变形场量的映射。

由自适应模板可知, 变形场量只在切边区域

发生改变, 因此只需对该区域单元进行处理, 而对于其他单元, 则可根据新旧单元号的映射关系直接获得。如图 5 所示, 变形场量映射有以下 3 个步骤。

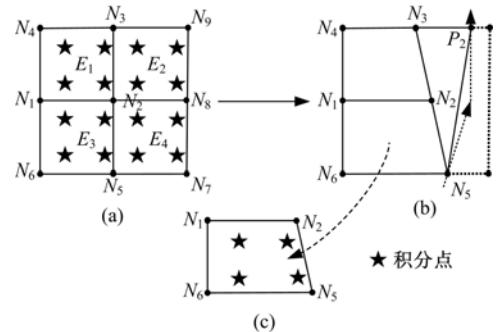


图 5 新旧网格变形场量的映射

Fig. 5 Deformation data mapping from old to new mesh

(1) 采用 2×2 Gauss 积分点双线性插值的外插方式, 将旧单元积分点场量转换到旧节点。

对于三边形单元, 采用单点积分, 因此节点的场量即是单元积分点的场量。对于四边形等参单元, 采取双线性插值的形式:

$$G^j = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi^j, \eta^j) G_i \quad (2)$$

式中: G_i 为节点 i 的场量; G^j 为 Gauss 积分点 j 的场量, $j = 1, 2, 3, 4$; i 为节点编号; $N_i(\xi^j, \eta^j)$ 为自然坐标下的双线性插值形函数:

$$N_i(\xi^j, \eta^j) = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi^j)(1 + \eta_i \eta^j) \quad (3)$$

式(2)的矩阵形式为

$$\{\mathbf{G}^j\} = [\mathbf{N}] \{G_i\} \quad (4)$$

可以证明矩阵 $[\mathbf{N}]$ 是非奇异矩阵^[7], 因此旧单元节点的场量可以表示为

$$\{G_i\} = [\mathbf{N}]^{-1} \{\mathbf{G}^j\} \quad (5)$$

式中:

$$[\mathbf{N}]^{-1} = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ b & a & d & c \\ c & d & a & b \\ d & c & b & a \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$a = 1 + \frac{\sqrt{3}}{2}, b = -\frac{1}{2}, c = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

通常, 多个单元共享同一个节点, 由式(5)计算的节点场量也不尽相同, 因此需要将其转换到整体坐标系下, 然后进行均化处理:

$$\bar{G}_i = \frac{G_i^1 + G_i^2 + \dots + G_i^n + \dots + G_i^n}{n} \quad (8)$$

式中: \bar{G}_i 为节点 i 的场量平均值; G_i^j 为单元 j 计算的节点 i 的场量; n 为节点 i 的邻接单元数。

(2)采用线性插值或双线性插值,由旧节点场量计算新节点场量。

如图 6 所示,首先需要计算新节点 P 在旧网格上的投影点,当投影点位于旧单元边上时,可由该边的两节点场量线性插值计算新节点场量;当位于旧单元内部时,需将投影点在单元内的局部坐标 $p(x, y)$ 转换为自然坐标 $p(\xi, \eta)$,下面进行简单推导。

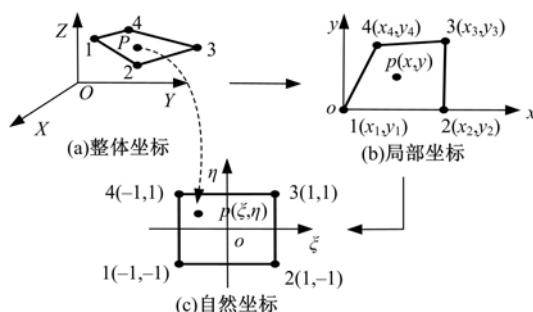


图 6 坐标变换示意图

Fig. 6 Description of coordinate transformation

采用双线性插值形函数的坐标插值形式为

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \cdot x_i \\ y = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \cdot y_i \end{cases} \quad (9)$$

将四边形单元的节点坐标 (x_i, y_i) 带入式(9),展开并整理可得

$$\begin{cases} a_1 + a_2 \xi + a_3 \eta + a_4 \xi \eta = 0 \\ b_1 + b_2 \xi + b_3 \eta + b_4 \xi \eta = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$$\begin{cases} a_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 - 4x \\ a_2 = x_2 + x_3 - x_1 - x_4 \\ a_3 = x_3 + x_4 - x_1 - x_2 \\ a_4 = x_1 + x_3 - x_4 - x_2 \\ b_1 = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - 4y \\ b_2 = y_2 + y_3 - y_1 - y_4 \\ b_3 = y_3 + y_4 - y_1 - y_2 \\ b_4 = y_1 + y_3 - y_4 - y_2 \end{cases} \quad (11)$$

可得,在 $\xi, \eta \in [-1, 1]$ 时,存在唯一的一组解 (ξ, η) 。最后带入式(2),可得到新节点的场量。

采用式(2)双线性插值的内插方式,由新单元节点场量计算新单元 2×2 Gauss 积分点场量。

3 不平衡应力的卸载

以上通过自适应模板的网格重构得到了切边后的网格模型,通过新旧网格变形场量的映射得到了切边后重新分布的变形场量。最后,需要进行不平衡应力的卸载模拟,计算切边回弹量。KMAS 成形分析软件回弹算法基于无模法,采用线弹性卸载模型对切边后的零件进行一步卸载回弹模拟。

如图 7 所示,线弹性卸载的基本思想是将切边后零件的边界看成自由边界,回弹后边界节点残余力应为零,在切边瞬时,使得切边边界节点残余应力暴露,因此需要在边界节点上施加一个与边界节点暴露的残余应力大小相同、方向相反的等效节点力,再进行线弹性卸载求解。线弹性卸载公式为

$$[\mathbf{K}] \{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{Q}\} \quad (12)$$

式中: $[\mathbf{K}]$ 为新网格整体刚度矩阵; $\{\mathbf{U}\}$ 为节点的位移向量; $\{\mathbf{Q}\}$ 为节点等效载荷向量。

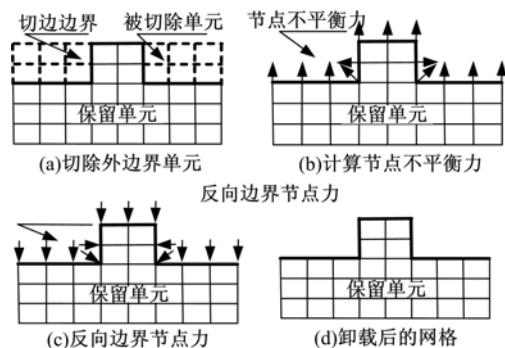


图 7 线弹性卸载示意图

Fig. 7 Description of linear elastic unloading

采用 BT 壳单元模型,每个节点具有 6 个自由度,随着对求解精度的要求不断提高,矩阵规模十分庞大。为了求解式(12)所示的稀疏线性方程组,采用列压缩存储技术和 UMFPACK 直接法求解器,与迭代法相比,不仅保证了求解精度,且具有占用内存少,求解速度快等优点。

4 标准实验与数值模拟

为了验证切边回弹算法的有效性,对 NUMISHEET 2005^[8] 提供的国际标准测试零件(某汽车底板横梁)进行了切边回弹模拟,材料类型为 BM2_DP600。图 8 显示了冲压模拟后的网格模型和切边线,考虑到对称性,只对 1/2 零件进行模拟。

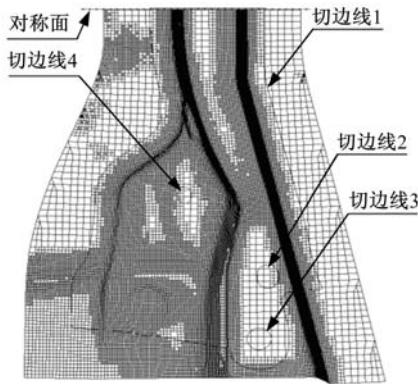


图 8 冲压后的网格和切边线

Fig. 8 Mesh and trimming lines after forming simulation

图 9 显示了自适应网格重构的结果,可看出重构后零件边界与切边线基本重合,且不存在边界锯齿、边界狭缝、边界单元打褶和边界单元尺寸相对太大或太小等问题。因而从整体上满足了回弹计算的要求。

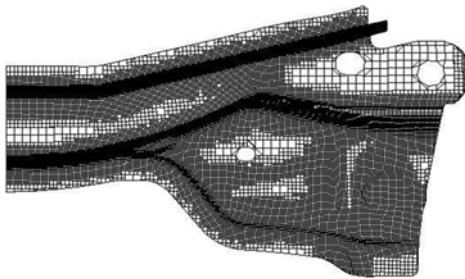


图 9 自适应网格重构后的网格

Fig. 9 Mesh after self-adaptive relocation of mesh

图 10 和图 11 显示了变形场量映射前后的等效应力分布,可看出场量映射后,等效应力分布连续,且对于同一位置,切边前后的等效应力基本保持一致,验证了场量映射算法的正确性。

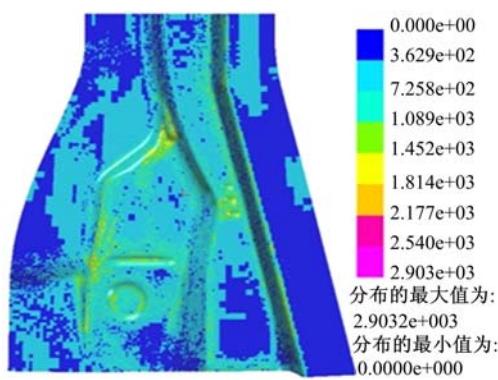


图 10 切边前的等效应力分布

Fig. 10 Distribution of equivalent stress before trimming

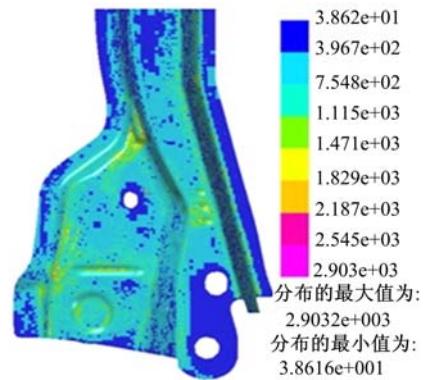


图 11 场量映射后的等效应力分布

Fig. 11 Distribution of equivalent stress after data mapping

图 12 显示了汽车底板横梁经过切边回弹模拟后的整体回弹量分布。表 1 显示了切边回弹模拟中的基本数据统计。图 13 显示了切边回弹模

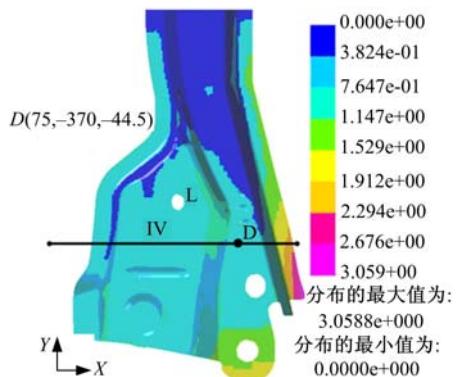


图 12 整体回弹量分布

Fig. 12 Distribution of total springback value

表 1 切边回弹模拟数据统计

Table 1 Data statistics of trimming springback simulation

单元数	节点数	PC 耗时/s	最大回弹量/mm
27055	27651	74.297	3.059

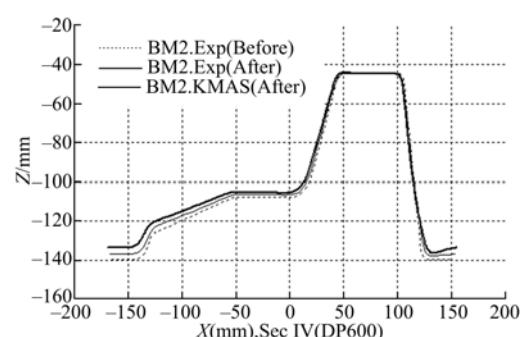


图 13 截面线 IV 的回弹轮廓对比

Fig. 13 Contour comparison of springback in section IV

拟后截面线 IV 的轮廓,并与实验数据进行对比。结果表明:本文切边回弹模拟的速度快,回弹量总体上小于实验值,但与实验值具有相同的回弹趋势。考虑到冲压成形模拟的累计误差,说明模拟结果是比较合理的,验证了该算法的有效性。

5 结 论

(1) 基于自适应模板的切边区域单元网格重构算法实现了加密网格切边,并保证了网格模型质量。

(2) 采取形函数插值方式的新旧网格变形场量映射能够准确地获得零件回弹前的变形场量分布。

(3) 基于线弹性卸载模型的一步回弹法能够准确地预测回弹趋势,但整体回弹量小于实际值。如何保证回弹计算的精度,仍是今后研究的难点。

参考文献:

- [1] Kawka M, Kakita T, Makinouchi A. Simulation of multi-step sheet metal forming processes by a static explicit FEM code[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80/81: 54-59.
- [2] Park Dong-Woon, Oh Soo-Ik. A four-node shell element with enhanced bending performance for spring-back analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(23/26): 2105-2138.
- [3] Mahmoud Y D, Maurice L, Michael J S. A benchmark test for springback simulation in sheet metal forming[C]//SAE Paper, 2000-01-2657.
- [4] 李春光,胡平,张向奎,等. 汽车覆盖件深拉延有限元仿真过程中的回弹及补偿试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2006(增刊 1): 70-74.
Li Chun-guang, Hu Ping, Zhang Xiang-kui, et al. Spring back and its compensation test in deep-drawing process of automobile panels by FEM[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2006(Sup. 1): 70-74.
- [5] 张晓静,周贤宾. 板材成形回弹模拟[J]. 塑性工程学报, 1999, 6(3): 56-62.
Zhang Xiao-jing, Zhou Xian-bin. Simulation of springback in sheet metal forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1999, 6(3): 56-62.
- [6] 白笛,周贤宾,李东升. 板材多工步成形中切边工序的数值模拟技术研究[J]. 塑性工程学报, 2004, 11(6): 20-25.
Bai Di, Zhou Xian-bin, Li Dong-sheng. Numerical simulation technique on trimming process of sheet metal multi-operation forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(6): 20-25.
- [7] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [8] 2005 NUMISHEET BENCHMARK 2. Springback prediction of a cross member[C]// Proceedings of the 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Detroit, USA, 2005: 15-19.