

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.045

薄板成形切边回弹模拟的切边算法*

周平¹ 郭威² 张向奎³ 胡平³

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130025;
3. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

【摘要】 为保证薄板多工步冲压成形切边回弹有限元数值模拟精度,提出了一种基于切边单元自适应模板的切边算法。首先进行三维切边线与零件网格的求交计算,生成有序截面线;然后进行单元取舍判断;最后沿截面线路径逐个单元调用自适应模板执行切边操作。算法避免了边界锯齿、对称约束和边界缝隙等缺点,并实现了多条切边线对加密网格进行一步切边,提高了切边效率。将算法集成到冲压成形分析软件 KMAS 系统切边回弹模块,通过对 NUMISHEET 2005 提供的国际标准考题——某汽车底板横梁拉延件的切边数值模拟,验证了算法的适用性和可靠性。

关键词: 薄板 冲压成形 切边回弹 数值模拟

中图分类号: TG386.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0222-05

Trimming Algorithm in Trimming Springback
Simulation of Thin Sheet Forming

Zhou Ping¹ Guo Wei² Zhang Xiangkui³ Hu Ping³

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China
2. College of Material Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China
3. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract

In order to assure the accuracy of trimming springback of multi-step forming by finite element method, a trimming algorithm based on self-adaptive template of trimmed elements was proposed. In this algorithm, the intersection calculation between 3-D trimming lines and mesh of part was executed at first. Then the accepting and rejecting judgement of elements was achieved. Finally, the method of trimming element by element along the path of the section lines was used in trimming operation. Therefore, the problems of boundary serration, axial symmetry and boundary gap have been totally avoided, and multi-trimming on refined mesh was achieved to improve the efficiency of trimming operation. The present algorithm has been integrated into the independently developed KMAS forming analysis system. By using the numerical simulation on automotive underbody cross member which was provided by benchmark test of NUMISHEET 2005, the applicability and reliability of introduced algorithm were verified.

Key words Thin sheet, Stamping forming, Trimming springback, Numerical simulation

引言

在汽车覆盖件制造领域,切边是复杂薄板多工

步成形过程中必不可少的工序。通过切边工序切除冲压件的工艺补充,形成最终的成品零件。但是由切边引起的切边回弹问题将严重影响汽车覆盖件的

收稿日期: 2009-03-31 修回日期: 2009-05-05

* 国家杰出青年基金资助项目(10125208)

作者简介: 周平, 博士生, 主要从事汽车车身先进设计与制造技术研究, E-mail: pingzhou_dr@yahoo.cn

通讯作者: 胡平, 教授, 博士生导师, 主要从事现代车身先进设计与制造技术研究, E-mail: pinghu@dlut.edu.cn

成形质量和尺寸精度,特别是高强度钢板,更加剧了切边回弹的不利因素^[1],这引起了国内外学者的重视^[2-5]。切边回弹包括切边处理、变形场量信息映射和不平衡残余内应力卸载等 3 部分。

传统的切边处理是完全移除切边线所在单元的内边界或外边界以外的所有单元,因此不可避免地引起边界锯齿,降低回弹计算的精度。虽然使用足够精细的网格能够改善边界锯齿,但是在保证模拟精度的前提下工程师更青睐于使用粗网格以缩短计算时间。另外,随着网格加密技术的应用,针对非加密网格的切边处理已不能满足需求。流行的商业化软件(如 DynaForm、AutoForm 等)的切边模块已经考虑了切边单元的拆分,提高了切边质量。本文提出一种基于切边单元自适应模板的切边算法。

1 切边算法基本思想

KMAS 软件在薄板回弹模拟中用 Belytschko - Tsay 壳单元模型,一般有三边形和四边形 2 种。因此,在切边处理中,可以将复杂的三维实体单元的切边转化为简单的二维平面单元的切边。本文只针对上述 2 种单元类型进行切边处理。

如图 1 所示,传统的切边处理只需简单地移除被切单元的内边界或外边界以外的所有单元,因此,在被保留单元的边界不可避免地出现锯齿缺陷。

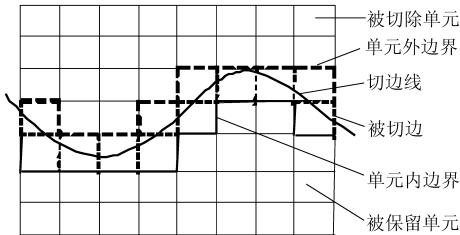


图 1 传统切边处理示意图

Fig. 1 Description of traditional trimming operation

如图 2 所示,自适应切边处理基本思想是通过一条或多条封闭或未封闭的有序分段线性切边线与有限元网格求交生成切边点,再按照规定动作移动内边界节点和拆分内边界单元,最终保证了切边零件的边界位于切边线上。显然,自适应切边处理的精度高于传统的切边处理。

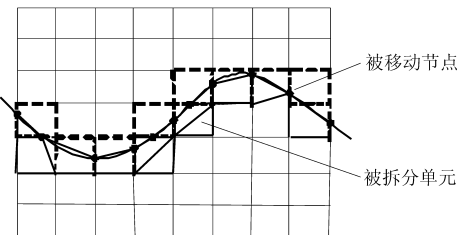


图 2 自适应切边处理示意图

Fig. 2 Description of self-adaptive trimming operation

2 截面线生成算法

在切边数值模拟中,采用一系列分段线性切边线来模拟切刀轮廓曲线形状,采用一系列切边平面模拟切刀的运动。针对同一个零件不同部位的切边,可能具有多个切刀运动方向,因此需要将切边线沿不同方向拉伸出切边平面。为了实现切边平面与网格求交生成截面线,首先需要将分段线性切边线上的点沿切边方向投影到网格。

如图 3 所示, M 代表单元所在平面, Q 代表单元上一节点, n 代表单元单位法向量, P 代表切边线一点, v 代表向量 QP , w 代表单位投影向量, $T(P)$ 代表 P 在单元 M 内的投影点。

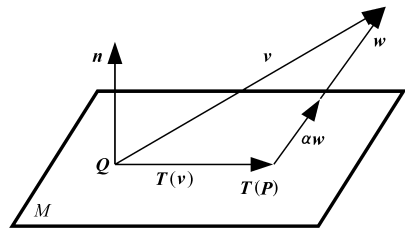


图 3 切边线投影到网格

Fig. 3 Projection of trimming line to the mesh

由仿射变换可得,将向量 v 变换到 $T(v)$ 的变换矩阵为

$$T_{n,Q,w} = \begin{bmatrix} T_{n,w} & 0^T \\ \frac{Qn}{wn} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$T_{n,w} = I - \frac{n \otimes w}{wn} \quad (2)$$

通过变换矩阵 $T_{n,Q,w}$ 可以计算出投影点 $T(P)$ 。通过判断投影点是否在单元多边形内最终确定投影点所在单元及坐标。通常,为了寻找投影单元,需要遍历网格所有单元,当网格规模较大时,会影响投影效率。鉴于此,本文采取空间格快速定位算法^[6],建立投影点或单元与空间格的映射关系,实现给定任意投影点即可快速定位与之关联的单元,从而达到快速投影的目的。然后,采取由两相邻投影点构成的空间平行四边形与单元求交生成截面线,如图 4 所示。

首先,由点 A 、 B 、 C 和 D 构造平行四边形 M 。 Q_i 和 Q_{i+1} 分别是单元 e_i 和 e_{i+1} 上的投影点, w_i 和 w_{i+1} 分别是 Q_i 和 Q_{i+1} 的投影方向,点 A 和 B 是 Q_i 沿 w_i 方向对应的上、下点,点 D 和 C 是 Q_{i+1} 沿 w_i 方向对应的上、下点。然后利用投影点或单元与空间格的映射关系,可快速获取与平行四边形 M 相交的单元集,从而求交生成截面线段 Q_iP 、 $Q_{i+1}P$ 等。切边点和截面线段的数据结构如下

class TTrimSidePoint

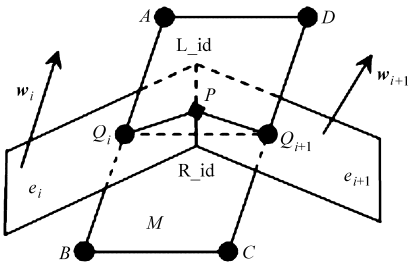


图4 切边平面与网格求交生成截面线
Fig.4 Creation of section lines by intersection between trimming planes and mesh

```
{
    double x, y, z; //坐标
    bool isOnEleSide; //是否在单元边上
    int L_id; //所在边的左节点号
    int R_id; //所在边的右节点号
};

class TLineEle
{
    int node1; //截面线段首端切边点
    int node2; //截面线段末端切边点
    int eleId; //截面线段所在单元号
};
```

然后需要对截面线段进行排序,如图5所示,模拟3条切边线对某对称零件进行切边后的排序处理。切边线1完全处于零件内部,求交后生成一条由 p_1 到 p_2 的封闭截面线段集;切边线2经过零件外边界,求交后生成一条由 p_3 到 p_4 的未封闭截面线段集;切边线3经过零件内外边界,求交后生成两条未封闭的截面线段集,一条由 p_5 到 p_6 ,另一条由 p_7 到 p_8 。

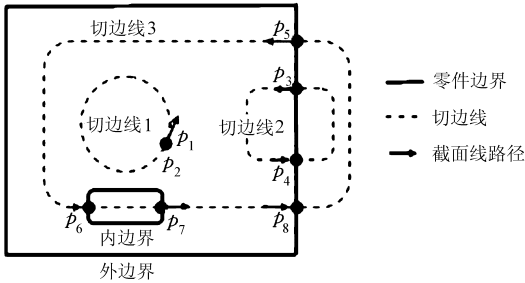


图5 截面线排序
Fig.5 Sorting algorithm of section lines

3 单元取舍判断

在自适应切边算法中,零件单元和节点被标记为3种模式:拆分、保留和删除,如图6所示。

为了快速准确地标记单元的3种模式,采用如下3种方法:① 拆分模式:截面线段所在的单元和节点。② 保留模式:采用“种子单元”遍历法,选择

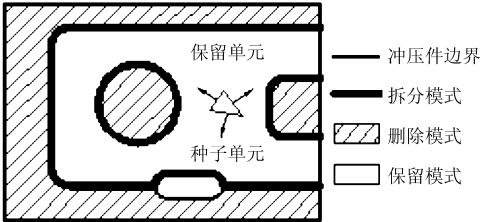


图6 单元取舍判断
Fig.6 Accepting and rejecting judgement of elements

一个种子单元,再根据网格拓扑信息逐步扩展,以遇到所有拆分或边界单元为扩展终止条件,遍历的单元和节点即处于保留模式。③ 删除模式:保留单元和拆分单元以外的单元即为删除单元。

上述方法以逻辑判断代替几何运算,具有准确、稳定和快速的优点。

4 切边单元自适应模板

切边单元自适应模板是指为处于拆分模式的内部节点规定移动原则和为处于拆分模式的单元制定拆分原则。自适应模板直接影响切边单元质量,因此建立合理的自适应模板对保证切边回弹精度具有很大意义。然后,采取沿截面线路径逐个单元调用自适应模块执行切边。对于加密网格,切边后需要更新加密信息。

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7所示。

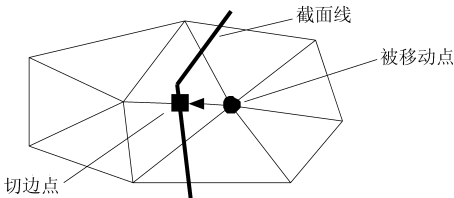


图7 切边比节点移动
Fig.7 Relocation of nodes based on “trimming ratio”

切边比定义为

$$\alpha = T/E \tag{3}$$

其中, T 指边被切除的长度, E 指边长。为了避免因节点移动而使单元过大或过小,合理的最大切边比 $\alpha_{\max}$ 尤为重要,通常取0.3。

下面以处于拆分模式的单元所包含的内部节点数和外部节点数为依据,制定详细的自适应模板。

(1) 1个内部节点

如图8所示, N_2 为内部节点, N_1 和 N_3 为外部节点, P_1 和 P_2 为切边点,路径为 $\overrightarrow{P_1P_2}$,对于当前单元, N_1N_2 为“入边”, N_3N_2 为“出边”。 α_i 为“入边”切边比, α_o 为“出边”切边比,并定义 $\beta = 1 - \alpha_{\max}$ 。下面讨论不同切边比对应的拆分原则:

当 $\alpha_o > \beta$

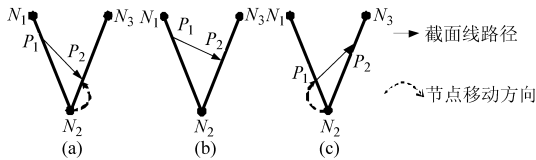


图 8 一个内部节点的自适应模板

Fig. 8 Self-adaptive template with one inner node

如图 8a,通常将 N_2 移动到 P_2 ;当 P_1 是截面线起点且对应的截面线为未封闭时,则需将 N_2 移动到 P_1 以保证切边边界不出现锯齿。

当 $\alpha_0 \leq \beta$ 且 $\alpha_i > \beta$

如图 8b,通常在处理首尾截面线段时出现,为了保证不出现锯齿,需将 N_2 移动到 P_1 。

当 $\alpha_0 \leq \beta$ 且 $\alpha_i \leq \beta$

如图 8c,生成新节点 P_2 和新单元 $P_1N_2P_2$ 。

(2) 2 个内部节点

当 $\alpha_0 > \beta$

如图 9a,一般地,将 N_3 移动到 P_2 ,并生成新单元 $P_1N_2N_3$ 。当 P_1 是截面线起点且 $\alpha_i > \beta$ 时,还需将 N_2 移动到 P_1 。

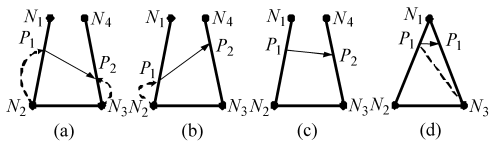


图 9 两个内部节点的自适应模板

Fig. 9 Self-adaptive template with two inner nodes

当 $\alpha_0 \leq \beta$ 且 $\alpha_i > \beta$

如图 9b,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 $N_2N_3P_2$ 。

当 $\alpha_{\max} \leq \alpha_0 \leq \beta$ 且 $\alpha_{\max} \leq \alpha_i \leq \beta$

如图 9c,只需生成新节点 P_1 和 P_2 和新单元 $P_1P_2N_3N_2$ 。

当 $\alpha_0 < \alpha_{\max}$ 且 $\alpha_i < \alpha_{\max}$ 三边单元

如图 9d,忽略切边点 P_2 ,生成新单元 $P_1N_2N_3$ 。

(3) 3 个内部节点四边形单元

如图 10 所示,首先生成三边单元 $N_2N_3N_4$;再将四边形 $N_2N_4P_2P_1$ 按照图 9 的方法进行处理。

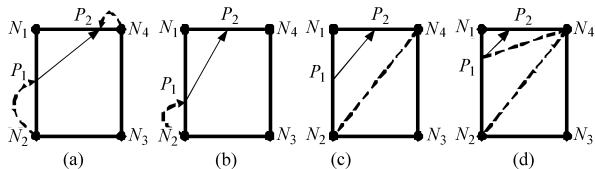


图 10 3 个内部节点的四边形单元自适应模板

Fig. 10 Self-adaptive template with three inner nodes refers to quadrangle element

(4) 全为内部节点或外部节点

如图 11 所示,当全为内部节点时,简化处理为

维持原单元不变。反之,删除此单元。

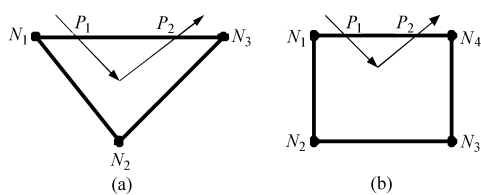


图 11 全为内部节点或外部节点的自适应模板

Fig. 11 Self-adaptive template with all inner nodes or all outer nodes refers to triangle element or quadrangle element

(5) 对称约束问题

如图 12 所示,执行对称零件切边操作时,如不进行特殊处理,则会出现图 12b 所示的锯齿。通过图 8b、图 9b 和图 10b 所示的模板,可以有效地将节点约束在对称轴上,如图 12c 所示。

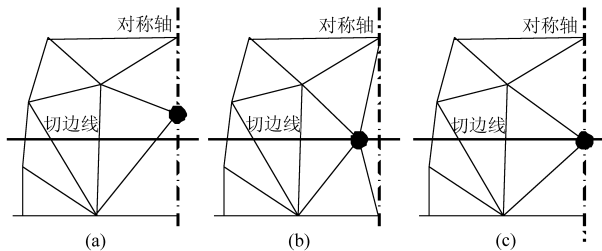


图 12 对称零件切边节点移动描述

Fig. 12 Relocation of nodes refers to symmetric parts

(6) 加密网格处理

网格加密技术作为解决数值模拟精度与效率之间矛盾的有效方法,得到了广泛应用。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 13a 和 13b 所示,处于内部的加密节点被约束为所在边的中点。另外,由于加密节点所在边上存在 3 个节点,因此按照上述自适应模板处理加密单元时,存在如图 13c 和 13d 的问题。在边 N_2N_3 和边 N_3P_2 之间出现边界缝隙,严重影响了网格质量,因此建立此类问题的检测算法,捏合点 P_1 和点 P_2 ,如图 13e 所示。

以上建立了完善的切边单元自适应模板,可以

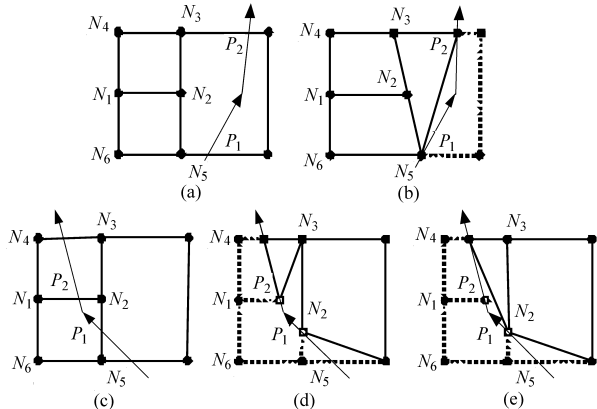


图 13 加密网格切边自适应模板

Fig. 13 Self-adaptive template with refined mesh

准确、稳定和快速地实现切边操作。同时,为了实现后续的变形场量信息映射算法,在调用自适应模板进行切边时,还应建立网格映射关系。

5 数值模拟实例

为了验证切边算法的适用性和可靠性,对 NUMISHEET 2005 提供的国际标准考题某汽车底板横梁进行了切边模拟。其中,成形阶段采用 KMAS 动力显式增量法进行模拟。如图 14 所示,进行多条切边线对加密网格进行一步切边,形成成品件的外边界和内部结构孔。

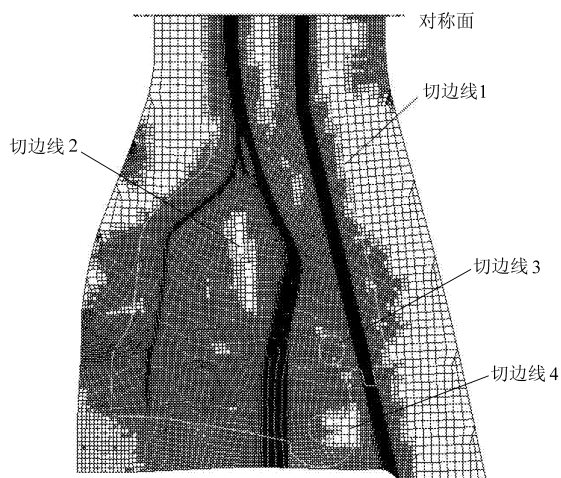


图 14 某汽车底板横梁切边前的网格和切边线

Fig. 14 Mesh and trimming lines with regard to some automotive underbody cross member before trimming operation

图 15 显示了切边后的网格,虽然处理切边处单元尺寸较大,切边线尺寸较小时切边边界光顺性较差(如图 14 中切边线 2、3 和 4 所在的区域,以后的工作中将就此展开研究),但是可以看出切边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、边界单元打折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精度的要求。

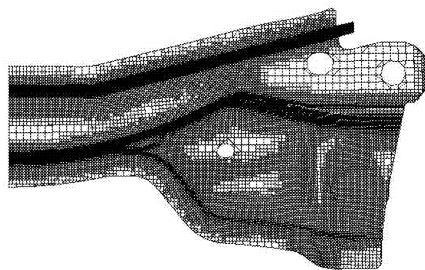


图 15 某汽车底板横梁切边后的网格

Fig. 15 Mesh of some automotive underbody cross member after trimming operation

6 结束语

根据截面线与网格单元的位置关系,建立了切边单元自适应模板,采取沿截面线路径逐个单元调用自适应模板进行切边操作,并对轴对称问题和加密网格问题进行了特殊处理,从而保证了切边单元质量。通过实例分析验证了该切边算法的适用性和可靠性。

参考文献

- 1 赵东旭. 轻量化车用钢板冲压成形与回弹数值仿真及工艺优化[D]. 长春:吉林大学,2006
Zhao Dongxu. The numerical simulation and technology optimization of the stamping forming of automotive lightweight steel and springback characteristics[D]. Chuangchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- 2 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.
- 3 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 Xiaojing, Zhou Xianbin. Simulation of springback in sheet metal forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1999, 6(3):56 ~ 62. (in Chinese)
- 4 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 Xianbin, Li Dongsheng. Numerical simulation technique on trimming process of sheet metal multi-operation forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004,11(6):20 ~ 25. (in Chinese)
- 5 Mahmoud Y D, Maurice L, Michael J S. A benchmark test for springback simulation in sheet metal forming[C]. SAE Paper 2000-01-2657, 2000.
- 6 胡平,鲍益东,胡斯博. 引入工艺因素的汽车车身部件碰撞仿真分析[J]. 固体力学学报, 2006,27(2):148 ~ 158.
Hu Ping, Bao Yidong, Hu Sibao. Crashworthiness simulation of automobile body part considering the formability effects of the part sheet metal[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006,27(2):148 ~ 158. (in Chinese)
- 7 闫康康,胡平,郭威. 铝合金板冲压成形 Benchmark 试验与有限元仿真[J]. 农业机械学报, 2009,40(11):232 ~ 235.
Yan Kangkang, Hu Ping, Guo Wei. Benchmark test and FEM simulation of aluminum alloy sheet forming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):232 ~ 235. (in Chinese)