

# 飞机橡皮囊成形零件毛坯精确预示方法研究

朱明华<sup>1,2</sup>, 王文斌<sup>1</sup>, 鲍益东<sup>1,\*</sup>, 黄翔<sup>1</sup>

1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016

2. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436

**摘要:** 橡皮囊成形是飞机钣金零件成型的主要方法之一,其初始毛坯形状的预示是橡皮囊成形中的一个难点问题。针对橡皮囊成形的工艺特点,提出了一种基于一步逆成形有限元法的飞机橡皮囊成形钣金零件毛坯快速精确预示方法。首先将设计好的飞机钣金零件作为最终构形,然后采用一步逆成形有限元法进行初始毛坯的快速反向模拟,最后将通过该方法获得的毛坯外形应用到实际飞机钣金橡皮囊成形中,实验结果表明该方法可以快速精确地预示出飞机橡皮囊成形钣金零件的初始毛坯形状。

**关键词:** 橡皮囊成形; 钣金零件; 毛坯; 一步逆成形; 有限元法

**中图分类号:** V261.2<sup>+8</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6893(2013)03-0670-07

飞机钣金件作为飞机结构组成的重要部分,直接影响着飞机的外形准确度和结构承载能力,其制造工艺已成为影响飞机整体性能的重要环节。橡皮囊成形是飞机钣金成型的主要方法之一,与常规的冲压生产相比,运用橡皮囊成形方法可制造出形状更加复杂的零件、提高贴模精度及改善零件表面质量,能够更好地解决零件强度、刚度、尺寸和精度之间的矛盾。利用高压橡皮囊成形的零件不经修整或经过少量修整便可直接用于装配,很适用于中小批量的生产和试生产<sup>[1-3]</sup>。

橡皮囊成形和其他的板料成形方式一样,其初始毛坯外形的设计是橡皮囊成形中一个非常重要的问题。试验证明,合理的毛坯外形不仅可以减少成形后的修边工作量,还可改善成形过程材料的应变分布,提高零件成形质量。钣金零件展开就是将钣金零件复杂的三维几何外形展开成平

板毛坯的过程。目前应用于实践或见诸报道的钣金展开方法主要有经验公式法、滑移线法、几何映射法、解析法和一步逆成形法<sup>[4-6]</sup>。

一步逆成形有限元法是一种通过数值模拟<sup>[7-16]</sup>求解毛坯外形的方法。钣金成形同时具有几何、材料和边界条件的非线性问题,一般需要用增量理论来进行数值模拟。但是在飞机钣金零件制造过程中,一般根据零件设计模型并行地生成模具和毛坯,在毛坯求解时没有模具信息提供,而一步逆成形有限元法能够很好地解决这个问题。

本文首先针对橡皮囊成形特点研究了一步逆成形有限元法的基本理论与公式,然后以某大型飞机上两种典型的橡皮囊成形钣金零件平尾翼尖肋与肋腹板为例子,通过一步逆成形有限元法进行了初始毛坯外形的精确预示模拟计算,将计算的初始毛坯外轮廓线与试验值进行比较,用来说

收稿日期: 2012-04-23; 退修日期: 2012-09-05; 录用日期: 2012-10-18; 网络出版时间: 2012-11-27 09:35

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20121127.0935.003.html

基金项目: 国家自然科学基金(51075206); 2011年度上海市高新技术产业化重点项目(11-42); 上海飞机制造有限公司2012年度创新基金

\* 通讯作者. Tel.: 025-84892570 E-mail: baoyd@nuaa.edu.cn

引用格式: Zhu M H, Wang W B, Bao Y D, et al. Research on precise blank prediction method of aircraft part by rubber bladder forming. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 670-676. 朱明华,王文斌,鲍益东,等. 飞机橡皮囊成形零件毛坯精确预示方法研究. 航空学报, 2013, 34(3): 670-676.

明一步逆成形有限元法精确预示橡皮囊成形毛坯外形的准确性与有效性。

## 1 一步逆成形法

### 1.1 一步逆成形法的运动关系

一步逆成形有限元法的基本思想是从产品的形状出发,将其作为变形终了时工件的中面,通过有限元方法确定在满足一定的边界条件下工件中各个节点在初始平板毛坯中的位置。一步逆成形有限元法仅仅考虑了最终构形  $C$  和初始平板料  $C_0$  两个状态,忽略了中间变形过程,并引入比例加载,板料与刚性模具(凸模或凹模)、板料与橡皮囊之间的相互作用力和接触条件可以通过等效外力加以考虑,平面应力等简化假设一步就可以预示出初始坯料形状和最终构形上的厚度、应变和应力等物理量的分布<sup>[5-8]</sup>。

根据柯西霍夫假设,如图 1 所示, $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{w}$  分别为在局部坐标系  $Ox_0y_0z_0$  下从点  $P_0$  到点  $P$  的位移在  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴上的分量。初始平坯料和最终零件构形上的任意质点  $P_0$  和  $P$  有以下关系:

$$\mathbf{x}_{P_0} = \mathbf{x}_P - \mathbf{u}_P \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_{P_0}$  为质点的初始坐标; $\mathbf{x}_P$  为质点的最终坐标; $\mathbf{u}_P$  为板料中性层上  $P_0$  的位移。

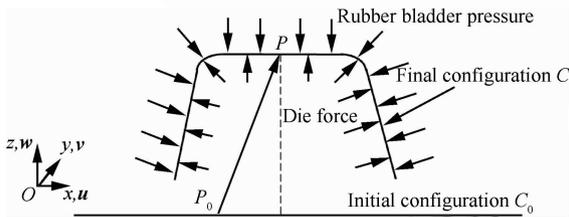


图 1 一步逆成形法运动关系图

Fig. 1 Kinematic relationship of one-step inverse forming method

所以在  $P$  点上的变形梯度张量的逆为

$$\begin{cases} d\mathbf{x}_{P_0} = \mathbf{F}^{-1} d\mathbf{x}_P \\ \mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F}_0^{-1} \mathbf{F}_z^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{F}_0^{-1}$  和  $\mathbf{F}_z^{-1}$  在局部坐标系下可以简单地表示为

$$\mathbf{F}_0^{-1} = \begin{bmatrix} 1 - \mathbf{u}_{,x} & -\mathbf{u}_{,y} & \frac{n_x}{\lambda_3} \\ -\mathbf{v}_{,x} & 1 - \mathbf{v}_{,y} & \frac{n_y}{\lambda_3} \\ -\mathbf{w}_{,x} & -\mathbf{w}_{,y} & \frac{n_z}{\lambda_3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_z = \begin{bmatrix} 1 + zn_{x,x} & zn_{x,y} & n_x \\ zn_{y,x} & 1 + zn_{y,y} & n_y \\ zn_{z,x} & zn_{z,y} & n_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  为 3 个主拉伸。

假设沿厚度方向的伸长量是一个常量,那么柯西-格林左张量  $\mathbf{B}$  的逆可以表示为

$$\mathbf{B}^{-1} = \mathbf{F}^{-T} \mathbf{F}^{-1} = \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ b & c & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^{-2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $a$ 、 $b$  和  $c$  为  $\mathbf{B}^{-1}$  的 3 个面内形变分量。

通过对  $\mathbf{B}^{-1}$  的特征值运算可以得到面内的两个主拉伸  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和它们的方向变换矩阵  $\mathbf{M}$ , 然后通过体积不变的原理可以得到厚度方向的主拉伸  $\lambda_3$ 。

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= \left[ \frac{1}{2}(a+c) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(a-c)^2 + 4b^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \lambda_3 &= (\lambda_1 \lambda_2)^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

最终,可以得到对数应变为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \ln \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ln \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \ln \lambda_3 \end{bmatrix} \mathbf{M}^T \quad (7)$$

式中: $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  和  $\epsilon_{xy}$  为 3 个应变分量。

### 1.2 节点内力计算

把一个已知的三维飞机钣金零件离散成三角形壳单元,忽略薄板的横向剪切效应,单元内力虚功可以表示为

$$\begin{cases} W_{\text{int}}^e = \int_{V^e} \boldsymbol{\epsilon}^*{}^T \boldsymbol{\sigma} dV \\ \boldsymbol{\epsilon}^*{}^T = \mathbf{e}^*{}^T + z \boldsymbol{\chi}^*{}^T \quad (-h/2 \leq z \leq h/2) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\epsilon}^*$  为膜的虚应变和弯曲虚应变的组合; $\mathbf{e}^*$  为膜的虚应变; $\boldsymbol{\chi}^*$  为膜的弯曲虚应变; $\boldsymbol{\sigma}$  为单元应力张量; $V$  为单元体积; $z$  为单元厚度方向坐标; $h$  为单元厚度。

考虑到三角形单元为平面单元,在局部坐标系下膜的虚应变可以通过虚位移的分量  $u^*$  和  $v^*$  表示为

$$\boldsymbol{\epsilon}^* = (\mathbf{B}_m + z\mathbf{B}_b) \mathbf{u}_n^* \quad (9)$$

式中: $\mathbf{B}_m$  为膜矩阵; $\mathbf{B}_b$  为弯曲矩阵。所以在全局坐标系下的单元内力  $\mathbf{F}_{\text{int}}$  为

$$\mathbf{F}_{\text{int}}^e = \mathbf{T}^T \int_{V^e} (\mathbf{B}_m^T + z\mathbf{B}_b^T) \boldsymbol{\sigma} dz dA \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{T}^T$  为坐标转换矩阵;  $A$  为单元面积。

### 1.3 节点外力计算

在一步逆成形有限元法中, 由于仅仅考虑了最终构型和初始板料两个状态, 不能考虑中间的加载历史过程, 所以板料和模具(包括刚性模具与柔性模橡皮囊)之间的相互作用力和接触条件只能简单地通过等效外力加以考虑。

如图 2 所示, 刚性模具(凸模或凹模)对板料的作用力可以分解成一个法向力  $\mathbf{P}_n$  和摩擦力  $\mathbf{P}_t$ , 它们的合力  $\mathbf{P}$  应该位于摩擦锥形曲面上, 图中  $D_0$  为节点  $D$  在初始板料中的对应节点,  $B$  为节点  $D$  在初始板料中的垂直投影点,  $\mathbf{t}$  为相对运动方向向量  $\mathbf{AD}$  在节点  $D$  的切平面上投影的单位向量,  $D$  的位移  $\mathbf{u}$  的水平分量为  $\mathbf{u}_h$ , 即板料节点与橡皮囊之间相对滑动方向的单位向量。

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \mathbf{P}_n + \mathbf{P}_t \\ \mu = \tan \alpha = \frac{P_t}{P_n} \\ \mathbf{n}^f = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} (\mathbf{n} - \mu \mathbf{t}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{n}$  为节点  $D$  的法线向量;  $\mathbf{n}^f$  为合力  $\mathbf{P}$  的方向向量;  $\mu$  为冲头和板料之间的摩擦系数。

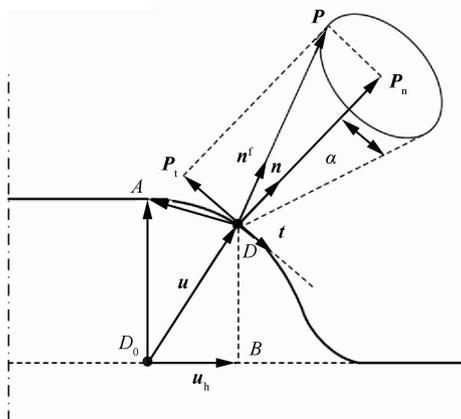


图 2 凸模上的作用力  
Fig. 2 Force of punch

由于节点  $D$  的相对运动方向向量  $\mathbf{AD}$  是未知量, 所以就用  $\mathbf{u}_h$  来近似代替  $\mathbf{AD}$ , 即

$$\begin{cases} \mathbf{t} = \frac{\mathbf{u}_t}{\|\mathbf{u}_t\|} \\ \mathbf{u}_t = \mathbf{u} - (\mathbf{u}_h \mathbf{n}) \end{cases} \quad (12)$$

假设橡皮囊的法向压强为  $q_n$ , 那么橡皮囊下单位面积的切向摩擦力  $f$  为

$$\begin{cases} f = -\mu q_n \mathbf{t} \\ \mathbf{t} = \frac{\mathbf{u}_t}{\|\mathbf{u}_t\|} \\ \mathbf{u}_t = \mathbf{u} - (\mathbf{u}_h \mathbf{n}) \end{cases} \quad (13)$$

### 1.4 本构方程

一步逆成形有限元法仅仅考虑初始平坯料  $C_0$  和最终三维零件  $C$  这两个构型, 因此, 假设弹塑性变形独立于加载路径, 所以本构方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{2\bar{\sigma}(2+\bar{r})}{3\bar{\epsilon}(1+2\bar{r})} \begin{bmatrix} 1+\bar{r} & \bar{r} & 0 \\ \bar{r} & 1+\bar{r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $\bar{\epsilon}$  和  $\bar{\sigma}$  分别为等效应变和等效应力。平均各项异性系数  $\bar{r}$  与 3 个各项异性系数之间的关系为

$$\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4 \quad (15)$$

## 2 实例验证

### 2.1 平尾翼尖肋零件的初始毛坯预示

平尾翼尖肋是某大型飞机结构件中一个非常典型的橡皮囊成形钣金零件, 其几何模型如图 3 所示。

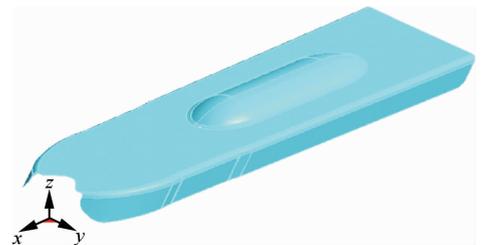


图 3 平尾翼尖肋几何模型  
Fig. 3 Geometry model of horizontal tail wingtip rib

平尾翼尖肋所采用的材料为包铝板 A2024-0, 模拟分析中采用的应力-应变关系曲线为  $\sigma = K\epsilon^n$ , 其材料力学性能参数为: 弹性模量  $E=72.4$  GPa, 泊松比  $\nu=0.33$ , 屈服应力  $\sigma_s=131.0$  MPa, 强化系数  $K=548.9$  MPa, 硬化指数  $n=0.23$ , 平均各

项异性系数  $\bar{r} = 0.653$ , 板料的初始厚度为 1.016 mm。

首先将设计好的平尾翼尖肋作为一步逆成形有限元法中的最终构形, 考虑到用户操作习惯以及保证有限元模型的质量, 将其离散成三角形与四边形混合的有限元网格, 最终该零件有限元模型中的单元总数和节点总数分别为 4 707 和 4 799, 如图 4 所示。由于一步逆成形有限元法采用的是三角形单元, 所以需要将上述有限元模型中的四边形单元沿较短对角线自动剖分成两个三角形进行计算求解。

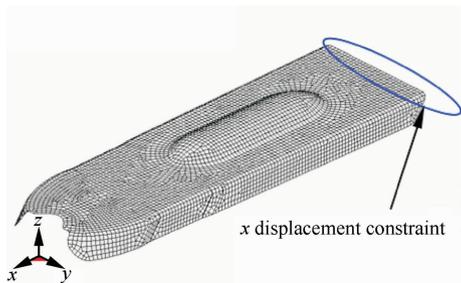


图 4 平尾翼尖肋的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of horizontal tail wingtip rib

由于平尾翼尖肋的几何模型是在机身坐标系下建立的, 所以在进行一步逆成形有限元法模拟计算前, 需要对其进行橡皮囊成形方向的自动确定操作。通过平均网格法线法<sup>[17]</sup>计算, 将零件分别沿全局坐标系  $z$  轴和  $y$  轴旋转  $125.523^\circ$  和  $-88.255^\circ$  后, 该零件就可以旋转到如图 4 所示的位置。经过上述旋转操作后, 平尾翼尖肋的有限元模型已经到达一个合适的位置, 完全满足一步逆成形有限元法的计算要求。

另外, 为了防止在计算过程中出现刚体平移的现象, 同时也考虑到确保计算后预示出的初始板料位置的精确性, 经过分析, 在平尾翼尖肋有限元模型右端头底部的一排节点上施加  $x$  方向的位移约束。经过几秒钟的快速计算求解后, 可以得到如图 5 所示的初始毛坯有限元网格。根据该有限元网格的拓扑关系, 可以快速地获取到初始毛坯的外轮廓线形状。

将通过一步逆成形有限元法计算所得的初始毛坯的外轮廓线与模具设计师经过多次调整修边操作后所得的实际生产所采用的初始毛坯外轮廓线进行比较, 其结果如图 6 所示。

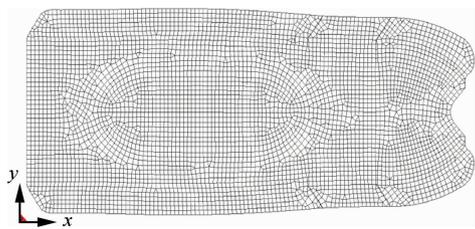


图 5 初始毛坯有限元网格

Fig. 5 Finite element grid for initial blank

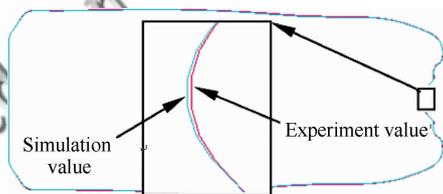


图 6 初始板料外轮廓线的比较

Fig. 6 Comparison of initial blank outline

通过图 6 的比较可以看出一步逆成形有限元法计算所得的初始毛坯外轮廓线与实际的初始毛坯外轮廓线非常接近, 除了图 6 中右端头的个别位置受基准面凸台变形的影响导致误差比较大以外, 其余地方都基本和试验值一致。

## 2.2 肋腹板零件的初始毛坯预示

肋腹板也是大型飞机结构中很典型的橡皮囊成形钣金零件, 图 7 为零件的几何模型, 肋腹板所采用的材料为包铝板 A2024-0, 板料的初始厚度为 1.270 mm, 模拟分析中采用的应力-应变关系曲线为  $\sigma = K\epsilon^n$ , 其材料力学性能参数为:  $E = 75 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.334$ ,  $\sigma_s = 113 \text{ MPa}$ ,  $K = 270 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.20$ ,  $\bar{r} = 0.716$ 。

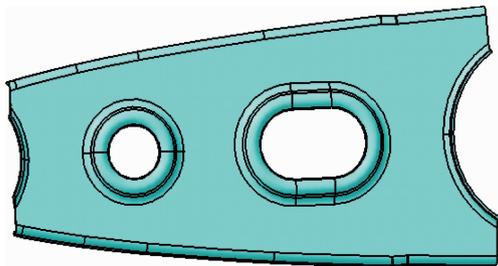


图 7 肋腹板几何模型

Fig. 7 Geometry model of webframe blank

首先定义出零件的分析型面作为一步逆成形有限元法中的最终构形,根据零件的尺寸,划分网格并偏置到中性层后,肋腹板的有限元单元总数为 8 509,有限元节点总数为 8 660,如图 8 所示。

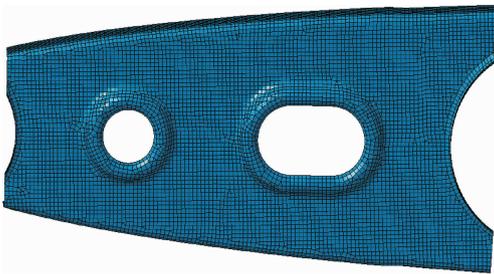


图 8 肋腹板有限元模型

Fig. 8 Finite element model of webframe blank

检查单元质量合格后,选用平均网格法线法自动设定成形方向,设定材料和经过实际测量的工艺参数,然后提交计算。经过十几秒钟的有限元计算,得到了如图 9 所示的初始毛坯轮廓线。

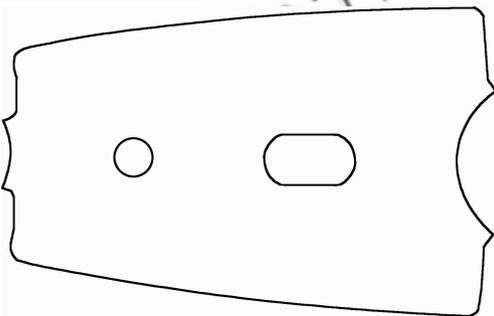


图 9 肋腹板毛坯外轮廓线

Fig. 9 Outline of webframe blank

导出分析得到的轮廓线,进行实际的橡皮囊成形试验验证,按此轮廓线下料的毛胚如图 10 所示,工程设计人员在零件的基准面上设计出两个工艺孔的位置,利用样板在展开料上钻出销钉孔。最后对橡皮囊成形后的零件进行检测,根据 HB5800-1999 中国航空工业标准与工厂内部工艺规范,该零件弯边角度的公差为  $\pm 30'$ ,弯边高度的公差为  $\pm 0.8$  mm,下陷区域的深度公差为  $\pm 1.0$  mm,将零件的弯边线对准样板的弯边投影线,然后对零件的弯边角度、弯边高度和下陷区域深度等关键部位进行检测,经检测上述部位都符合设计公差要求。



图 10 实际制造下料的毛坯

Fig. 10 Blank sheet of actual manufacture

### 3 结 论

1) 基于一部逆成形有限元法的橡皮囊成形初始毛坯预示方法可以比较准确并快速地预示出橡皮囊成形所需的初始毛坯外轮廓线,大大降低生产实践中模具设计人员的调整和修边工作量。

2) 橡皮囊成形初始毛坯的预示模拟过程只需十几秒的计算时间。如果采用动力显式增量法有限元进行同样模拟,时间将延长几百倍。因此,本文方法从仿真效率来讲是非常高效的。

### 参 考 文 献

- [1] Han Z R, Wu N, Zhan Q X, et al. Study on springback law in rubber fluid forming by experiment and FEM. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(3): 98-102. (in Chinese)  
韩志仁, 吴娜, 詹庆熙, 等. 基于试验和有限元方法的橡皮囊液压成形回弹规律. 塑性工程学报, 2010, 17(3): 98-102.
- [2] Fu Y F, Gao L, Wang H. A review of the research on rubber bladder forming. Manufacture Information Engineering of China, 2009, 38(7): 59-63, 66. (in Chinese)  
付云芳, 高霖, 王辉. 橡皮囊成形的研究进展. 中国制造业信息化, 2009, 38(7): 59-63, 66.
- [3] Chen L, Qiu X, Li S L, et al. Analysis and experiment study on springback of straight flanging in rubber fluid forming. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 47-48, 60. (in Chinese)  
陈磊, 邱晔, 李善良, 等. 橡皮囊液压成形直弯边回弹试验与分析研究. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 47-48, 60.
- [4] Han Z R, Liu Y Z. Research and progress on optimum blank development shape methods for sheet metal forming. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(1): 7-11. (in Chinese)  
© 航空学报编辑部 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

- 韩志仁, 刘跃专. 钣金成形毛坯展开方法研究进展. 塑性工程学报, 2009, 16(1): 7-11.
- [5] Lu Y J, Liu C, Wang J B. Research and application status of aircraft sheet metal parts development algorithms. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008 (21): 86-89. (in Chinese)  
卢元杰, 刘闯, 王俊彪. 飞机钣金零件展开计算方法的研究和应用现状. *航空制造技术*, 2008 (21): 86-89.
- [6] Han Z R, Tao H, Zhu L. New approach to determine Blank in sheet metal forming. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(1): 125-128. (in Chinese)  
韩志仁, 陶华, 朱莉. 一种确定钣金成形件毛坯的新方法. *航空学报*, 2005, 26(1): 125-128.
- [7] Guo Y Q, Batoz J L, Detraux J M, et al. Finite element procedures for strain estimations of sheet metal forming parts. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1990, 30(8): 1385-1401.
- [8] Batoz J L, Guo Y Q, Mercier F. The inverse approach with simple triangular shell elements for large strain predictions of sheet metal forming parts. *Engineering Computations*, 1998, 15(7): 864-892.
- [9] Guo Y Q, Batoz J L, Naceur H, et al. Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach. *Computers & Structures*, 2000, 78 (1-3): 133-148.
- [10] Lee C H, Huh H. Blank design and strain estimates for sheet metal forming processes by a finite element inverse approach with initial guess of linear deformation. *Journal of Materials Processing Technology* 1998, 82 (1): 145-155.
- [11] Du T, Liu Y Q, Zhang Z B, et al. Fast FE analysis system for sheet metal stamping—FASTAMP. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187: 402-406.
- [12] Huang Y, Chen Y P, Du R X. A new approach to solve key issues in multi-step inverse finite-element method in sheet metal stamping. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, 48(6): 591-600.
- [13] Bao Y D, Chen W L, Wu H. Fast springback simulation of bending forming based on one-step inverse analysis. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, 22 (31-32): 6057-6063.
- [14] Bao Y D, Huh H. Optimum design of trimming line by one-step analysis for auto body parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187: 108-112.
- [15] Xu G Y, Shi F Z. The application of inverse approach in the initial design for sheet metal forming. *Journal of Plasticity Engineering*, 2003, 10(1): 40-43. (in Chinese)  
徐国艳, 施法中. 反向法在冲压件成形初期设计阶段的应用. *塑性工程学报*, 2003, 10(1): 40-43.
- [16] Lan J, Dong X H, Li Z G. Inverse finite element approach and its application in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170(3): 624-631.
- [17] Zhou W, Zhai J J, Chen W L. An approach of automatic calculation for stamping parts. *Manufacture Information Engineering of China*, 2009, 38(5): 22-24. (in Chinese)  
周伟, 翟建军, 陈文亮. 冲压件拉伸方向的自动计算方法. *中国制造业信息化*, 2009, 38(5): 22-24.

#### 作者简介:

**朱明华** 女, 博士研究生, 研究员。主要研究方向: 飞机钣金零件成形工艺。

Tel: 021-61385691

E-mail: zhuminghua@comac.cc

**王文斌** 男, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 大型飞机制造。

Tel: 021-61385691

E-mail: wangwenbin@comac.cc

**鲍益东** 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 板料成形与控制。

Tel: 025-84892570

E-mail: baoyd@nuaa.edu.cn

**黄翔** 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 数字化设计、制造与检测。

Tel: 025-84892910

E-mail: xhuang@nuaa.edu.cn

## Research on Precise Blank Prediction Method of Aircraft Part by Rubber Bladder Forming

ZHU Minghua<sup>1, 2</sup>, WANG Wenbin<sup>1</sup>, BAO Yidong<sup>1, \*</sup>, HUANG Xiang<sup>1</sup>

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 200436, China

**Abstract:** Rubber bladder forming is one of the main forming methods for aircraft sheet metal parts in which the prediction of initial blank shape is difficult. In accordance with the technology characteristics of rubber bladder forming, a fast prediction method is proposed for the initial blank shape of a rubber bladder formed part based on one-step inverse forming finite element method. Firstly, the designed aircraft sheet metal part is treated as the final configuration; then a quick reverse simulation is carried out to obtain the initial blank by the one-step inverse finite element method. Finally, the blank outline from the above method is applied to real rubber bladder forming manufacture. The experimental results demonstrate that this method can predict the precise initial blank shape for a rubber bladder forming part.

**Key words:** rubber bladder forming; sheet metal part; blank; one-step inverse forming; finite element method

**Received:** 2012-04-23; **Revised:** 2012-09-05; **Accepted:** 2012-10-18; **Published online:** 2012-11-27 09:35

**URL:** www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20121127.0935.003.html

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (51075206); 2011 Advanced Technology Key Project of Shanghai Municipal Commission of Economy and Informatization (11-42); 2012 Innovation Funds of Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd.

\* **Corresponding author.** Tel.: 025-84892570 E-mail: baoyd@nuaa.edu.cn