

飞机橡皮囊成形钣金零件毛坯 预示系统开发

Development of Blank Prediction System for Rubber Bladder Forming of Aircraft Sheet Metal Parts

南京航空航天大学 朱明华 姜丹丹 张显藤 鲍益东
上海飞机制造有限公司 刘 垒



朱明华

博士研究生, 研究员, 主要研究方向为飞机钣金零件成形工艺。

基于一步逆成形有限元法的橡皮囊成形初始毛坯设计系统 RBSE 可以快速准确地预示出橡皮囊成形钣金件所需的毛坯外形, 指引下料, 有效减少实际生产中手工修整量, 缩短生产周期, 提高效率。

力的作用下金属板料随着刚性凹模逐渐成形。半模成形的特点使得材料的塑性得以充分发挥, 能制造出高复杂形状的零件, 并且能有效提高成形零件的贴模准确度^[1-4]。

零件初始毛坯预示是橡皮囊成形的一个关键步骤, 同时也是一个难点问题。初始毛坯形状会直接影响成形零件的质量, 在钣金零件成形过程中, 合理的毛坯形状可以明显提高材料的可成形性, 减少成形后的修边工作量, 从而提高材料的利用率。传统的钛合金橡皮囊成形初始毛坯形状的确定主要依靠设计人员的经验, 采用纯几何的方式进行展开, 设计误差较大, 后期需要进行手工修整, 生产周期长成本高。为减少不必要的重复劳动, 生产实际中也越来越多地

采用 CAE 技术进行钣金件橡皮囊成形的初始毛坯预示。

目前应用较多的毛坯预示方法有滑移线法、几何映射法、模拟法、逐次逼近法和一步逆成形法等^[5-7]。一步逆成形有限元法基于全量理论, 只考虑最终零件的几何形状和初始厚度, 沿着与成形过程相反的方向求解毛坯形状。在飞机钣金零件设计过程中, 毛坯求解时一般没有模具信息提供, 采用该方法可以快速有效地预示零件毛坯形状, 并行地设计模具和毛坯^[8-13]。

目前专业的 CAE 软件都有基于一歩逆成形有限元法的毛坯预示模块, 如 DYNIFORM 的 BSE 模块和 AUTOFORM 的 OneStep 模块。但是在使用这些软件预示毛坯形状时,

构成飞机产品外形、结构和内装的主要零件基本都是钣金件, 其形状复杂、质量控制严格, 且对成形后的零件有明确的力学性能和物理性能的要求, 所以加工较为困难。

目前, 航空工业主要采用橡皮囊成形方法来成形钣金件。这是由于橡皮囊成形中利用橡皮作为弹性凸模, 用高压液体作为传压介质, 在压

都需要先在 CAD 软件中建立三维数模,再将模型进行转换导入到 CAE 软件中,这样很容易出现数据丢失和精度丢失的情况。而且对于模具设计人员来说,还需要具备专业的有限元知识并学习 CAE 软件的操作,无疑增加了模具设计的工作量和难度。

针对上述问题,设计并开发了橡皮囊成形初始毛坯快速设计系统 RBSE (Rubber Blank Size Estimation)。该系统基于 CATIA 平台,采用一步逆成形有限元法,根据实际橡皮囊成形工艺,实现了零件毛坯的快速预示。

首先针对橡皮囊成形钣金件研究了一步逆成形有限元法的基本理论与本构方程,然后以某大型飞机上钛合金橡皮囊成形零件下陷类零件为例子,利用橡皮囊成形初始毛坯快速设计系统 RBSE 进行毛坯预示,根据预示出的毛坯外形进行下料,成形出合格的零件,以此验证本系统的准确性和快速性。

一步逆成形有限元法的基本理论

1 运动关系

一步逆成形法的主要特点是将板料成形过程简化为一个或若干个简单加载的变形过程,计算时仅仅考虑了初始构形和最终构形,忽略中间变形过程,如图 1 所示。将零件的最终形态和板料的初始厚度作为已知量,并引入了比例加载,板料与模具以及橡皮囊之间的相互作用力和接触条件通过等效外力加以体现,来求

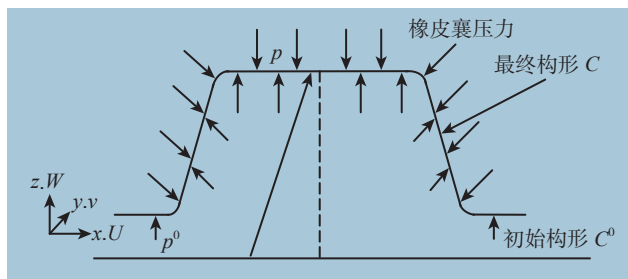


图1 一步逆成形有限元法运动关系图

解板料形状^[14-15]。

对某一点处的位移函数进行求导,可以得到左柯西-格林张量 [B] 的逆为:

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

求解 [B]⁻¹ 的特征值和特征向量可以得到局部坐标系下的 3 个主应变以及它们的方向变化矩阵 [M], 由此可以得到应变:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} \ln \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ln \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \ln \lambda_3 \end{bmatrix} [M]^T \quad (2)$$

2 节点内力计算

这里采用的是三角形膜单元,根据 Kirchhoff 假设,可忽略薄壳的横向剪切效应,在膜单元的局部坐标系下用虚位移的两个分量表示膜的需应变:

$$\{\varepsilon^e\} = ([B_m] + z[B_b])\{u_n^e\} \quad (3)$$

式中, [B_m] 是膜矩阵, [B_b] 是弯曲矩阵。

根据虚功原理可以得到单元内力为:

$$\{F_{int}^e\} = [T]^T$$

$$\int_{V^e} ([B_m]^T + z[B_b]^T)\{\sigma\} dV \quad (4)$$

3 节点外力计算

将模具(凸模或凹模)对板料的作用力分解成法向力 p_n 和切向摩擦 p_t, 总作用力 p 刚好在摩擦锥形曲面

上。

$$\begin{cases} p = p_n + p_t \\ \mu = \tan \alpha = \frac{p_t}{p_n} \\ n^f = \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}}(n - \mu t) \end{cases} \quad (5)$$

式中, μ 为模具和板料之间的摩擦系数; t 为节点 D 与模具之间相对运动量在切平面上的单位向量。

橡皮囊的法向压强为 q_n, 则橡皮囊作用下的切向摩擦力 f 可以表示为:

$$f = -\mu q_n t \quad (6)$$

式中, t 为板料节点与橡皮囊之间相对运动量在切平面内的单位向量。

4 本构方程

一步逆成形有限元法在计算时不考虑板料中间变形过程,因此,假设弹塑性变形是独立于加载路径的,所以本构方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{2\bar{\sigma}(2+\bar{r})}{3\bar{\varepsilon}(1+2\bar{r})}$$

$$\begin{bmatrix} 1+\bar{r} & \bar{r} & 0 \\ \bar{r} & 1+\bar{r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, ε̄ 是等效应变; σ̄ 是等效应力; r̄ 是平均各项异性系数, 其与 3 个各项异性系数之间的关系为 r̄ = (R₀ + 2R₄₅ + R₉₀)/4。

RBSE 系统总体设计

为了使工程技术人员能够直接在 CAD 软件中进行钣金零件的毛坯设计工作,采用 CAA 二次开发技术设计并开发了 BRSE 系统,如图 2 (a) 所示的是 RBSE 系统的操作主界面。本系统是基于 CATIA 平台的,其系统界面与 CATIA 平台设计思想、风格、操作规范均是一致的,其操作界面简洁美观,采用交互人性化的设计,并且根据实际工艺流程向用户提供向导式操作,在上一步操作未完成时下一步操作处于未激活的状态。这样的设计有效减少用户在前处理定义过程中出现错误。

系统的整体流程如图 2 (b) 所

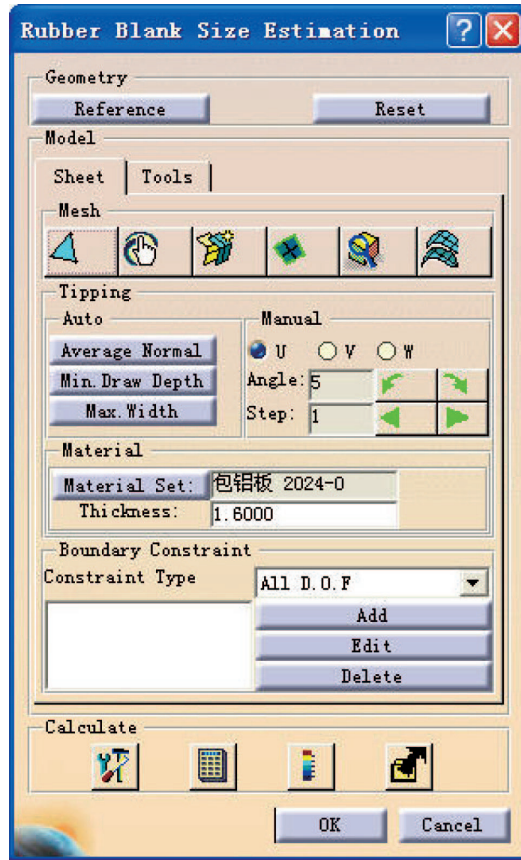
示。首先利用 CATIA 的 CAD 功能建立零件及工具数模,然后定义橡皮囊成形零件的型面作为凹模或凸模,再定义其他可能需要的工具,将它们划分成不同的网格类型并进行网格质量检查,达到要求后定义成形方向、材料属性、边界条件、工艺参数等。之后提交给求解器进行计算,待求解结束后可以在后处理模块中查看分析并作进一步的数据处理。

RBSE 系统分为前处理、求解器和后处理三大模块,同时每个模块根据功能又可细分为若干个子模块,其总体设计如图 3 所示。前处理主要包括网格划分、成形方向定义、工具定义、材料定义、约束定义等功能;求解器模块可以定义工艺条件、设置求解器参数、并调用求解器进行计算求解;后处理用于对得到的求解结果进行进一步的数据处理和分析。

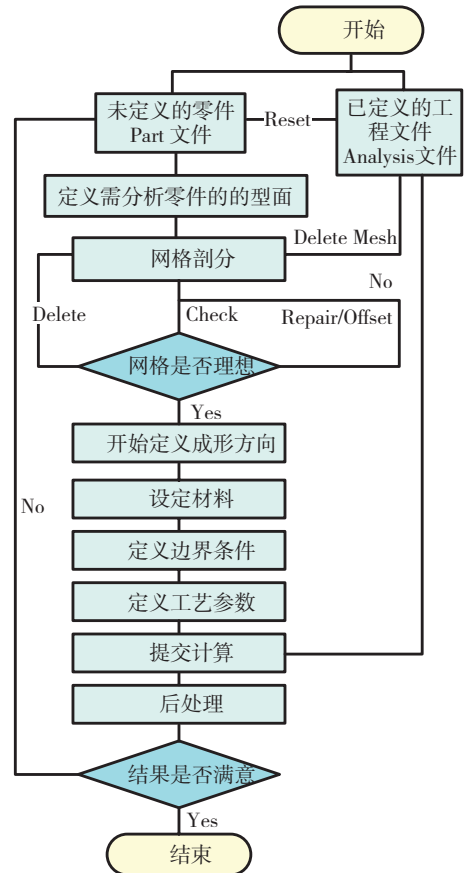
实例验证

1 某下陷类零件的初始毛坯预示
下陷类零件是某大型飞机结构

件中一种非常典型的钛合金橡皮囊成形零件类型,其几何模型如图 4 所示,零件最大长度为 230mm,宽度为 41mm;下陷长度为 230mm,公差为



(a) RBSE 系统总界面



(b) 系统流程图

图2 BSE系统整体设计图

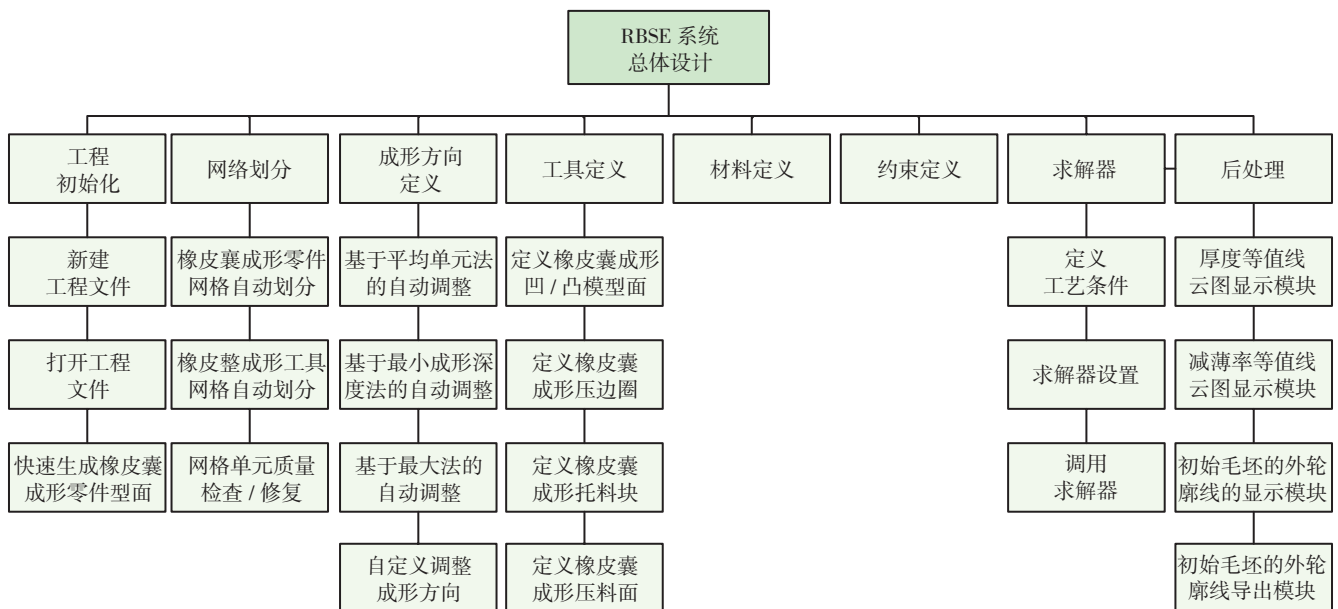


图3 系统总体设计图

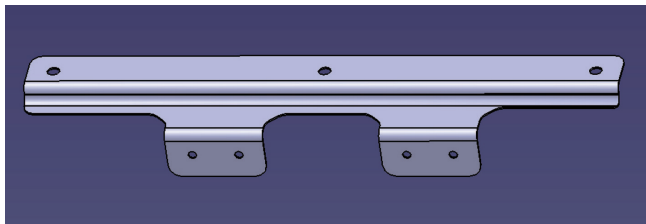


图4 零件的几何模型

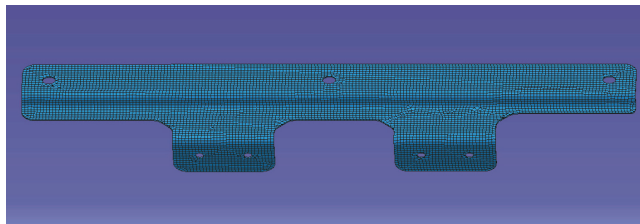


图5 零件的有限元模型

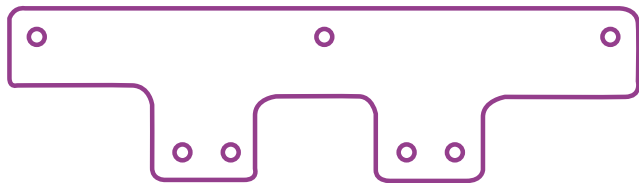


图6 零件的外轮廓线



图7 成形零件实物

0~0.2mm；下陷深度为7mm，公差为0~0.8mm。

该零件所采用的材料为CP3钛合金，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 $E=110\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ ，屈服应力 $\sigma_s=373.0\text{MPa}$ ，强化系数 $K=876.6\text{MPa}$ ，硬化指数 $n=0.15$ ，平均各项异性系数 $\bar{r}=0.848$ ，板料厚度为0.635mm。

首先将设计好的下陷类零件作为一步逆成形有限元法中的最终构形，抽取零件的中性层对其划分网格，模型共含有13910个单元和13863个节点，如图5所示。一步逆成形有限元法中采用的全是三角形单元，所以在计算开始之前必须将四边形单元离散成2个三角形单元，这里均沿着其较短对角线自动剖分。

网格单元划分完毕之后需要对零件橡皮囊成形方向进行确定。零件模型的建立是基于机身坐标系的，为了满足一步逆成形有限元法的计算要求，这里采用平均网格法线法自动确定其成形方向。提交计算，经过几秒的快速求解，可以得到零件毛坯的外轮廓线，如图6所示。

导出计算得到的轮廓线，并按此轮廓线进行实际下料，考虑到成形过程中板料的装夹定位，在板料侧面设

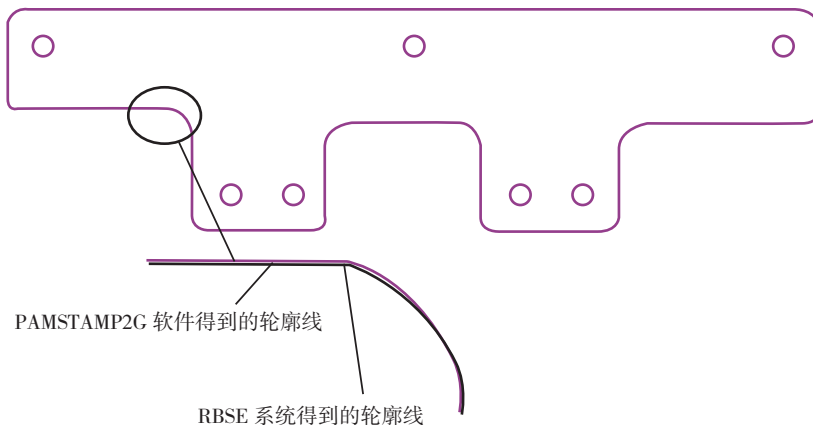


图8 外轮廓线对比图

计一对耳片结构，最终的橡皮囊成形零件如图7所示。对成形后零件的下陷长度和下陷深度等关键部位进行检测，均符合设计公差要求。

2 与 PAMSTAMP2G 软件的结果对比

PAMSTAMP2G 是目前工程行业运用较为广泛的板料成形分析商用软件。将上述的零件模型导入 PAMSTAMP2G 中，采用其中的 INVERSE 模块对该零件进行展开，得到初始毛坯的外轮廓线，并与之前通 RBSE 系统得到的结果进行比较，如图8所示。

从图中可以看出，RBSE 系统得到的外轮廓线与商用软件 PAMSTAMP2G 的结果特别接近，说

明本系统具有较高的精度和可靠性。

结束语

(1) 基于一部逆成形有限元法的橡皮囊成形初始毛坯设计系统 RBSE 可以快速准确地预示出橡皮囊成形钣金件所需的毛坯外形，指引下料，有效减少实际生产中手工修整量，缩短生产周期，提高效率。

(2) RBSE 系统的研发基于 CATIA 平台，操作界面采用向导式设计，便于操作，并且实现了 CAD 和 CAE 的无缝集成。

本文共有参考文献 15 篇，因篇幅所限，未能一一列出，如有需要，请向本刊编辑部索取。(责编 小城)