

复杂空间曲面薄板冲压成形回弹预测

杨忠炯,袁宏亮,周立强,姜东身

(中南大学 机电工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要:为了预测复杂空间曲面薄板冲压成形的回弹,以混凝土搅拌车螺旋叶片为例,提出了一种基于薄板能量函数的复杂空间曲面薄板的冲压成形回弹预测方法。首先通过粒子群优化算法得到毛坯直线在曲面上的映射,接着引入映射曲线上节点坐标参数 u ,并将节点转化为控制顶点;然后将由控制顶点表示的曲面函数代入由板壳理论建立的薄板能量函数,借助最小能量原理建立曲面节点应变的解析参数方程,求解方程即能得到曲面各节点应变;最后利用塑性变形理论推导复杂空间曲面各节点的回弹量,拟合回弹后重新分布的节点就能得到回弹后曲面。研究结果表明:基于能量函数的半解析半数值的薄板冲压回弹预测算法能够较为准确地预测螺旋叶片冲压成形的回弹,与现行的数值模拟法相比,简单易行,计算速度快,对复杂空间曲面预测具有一定的工程指导意义。

关键词:机械工程;回弹预测;粒子群优化;最小能量原理;塑性变形理论

中图分类号: TG386

文献标志码: A

Springback prediction in sheet metal stamping process on complex space curved surface

YANG Zhong-jiong, YUAN Hong-liang, ZHOU Li-qiang, JIANG Dong-shen

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to predict thin plate of complex space curved surface's springback in sheet metal stamping process, taking concrete mixer helical blade for example, a method to predict complex space curved surface's springback was proposed based on sheet metal plate's energy function. Firstly, according to the theory of particle swarm optimization method, blank line's mapping on curved surface was obtained, then, mapping curve node's coordinate parameters u were introduced and nodes were transformed into control vertexes. And surface function represented by control points were substituted into thin plate's energy function established by the shell theory. With the help of minimum energy principle, surface nodes strain's parameter equation was established, and surface nodes' strains could be obtained by solving the equations. Finally, using the deformation theory of plasticity, springback of each node on complex space curved surface was deduced, and by fitting the nodes redistributed after springback, the surface after springback was gained. The results show that the semi-analytical and semi-numerical springback prediction algorithm based on energy function can relatively accurately predict springback of helical blade in sheet metal stamping process, has the advantages of simple

implementation and fast computation speed when compared with nowadays popular numerical simulation method and is of certain instructive significance on complex space curved surface prediction. 1 tab, 12 figs, 20 refs.

Key words: mechanical engineering; springback prediction; particle swarm optimization; minimum energy principle; deformation theory of plasticity

0 引言

螺旋叶片是混凝土搅拌车的核心部件,叶片质量的好坏直接影响搅拌车的搅拌与出料性能,而螺旋叶片是通过模具冲压得到的,为了减少叶片装配误差及保证叶片搅拌、出料性能,必须减少冲压叶片与理想叶片的偏差^[1]。而偏差的存在主要是由于回弹和焊接变形的存在,因焊接变形可通过焊接工艺来控制,本文只讨论回弹的控制,而回弹控制的关键就是回弹预测^[2]。回弹预测问题主要有解析法、数值模拟法、试验法。解析法能避开板料冲压成形阶段的复杂建模,直接预测板料回弹量,但由于回弹问题具有高度的非线性,故解析法只适合求解二维简单冲压件的回弹问题,且其做了大量的简化假设,这就给计算结果带来误差。数值模拟法能处理复杂的几何形状及边界条件,在回弹问题的处理上有不可替代的优势,但数值模拟法的回弹分析结果与用户的使用水平关系很大,且数值法分析回弹量的预测精度受到材料模型、单元类型、接触摩擦处理、非线性算法等因素的影响,故计算所需时间较长,系统开销大。试验法可以直接获得实际结构在真实载荷和工艺条件下的数据,但其不仅受试验条件的影响,还与试验数据处理方法等因素有关。

如能将解析法与数值法结合起来——半解析半数值算法,发挥各自的优点,规避其缺点,则能为回弹预测提供一种既简单又高效的算法。Xue 等提出了基于能量法的双向弯曲的回弹预测方法^[3-4];周驰等在 Xue 的基础上,对其进行了改进,使该方法能适应于多曲率截面形状的回转零件^[5];廖娟等在前两者的基础上进一步改进算法,建立了方形高强板在双向等曲率模具中的冲压回弹预测模型^[6]。以上

算法都只适用于双曲率件或者回转件,不能预测形状不规则复杂空间曲面薄板的回弹。为此,本文在上述研究的基础上,引进复杂空间曲面 B 样条表达式、薄板变形能函数和粒子群算法求解曲面应变,并应用塑性变形理论求解回弹,将基于能量函数的半解析半数值的薄板冲压回弹预测算法(简称能量法)应用于复杂空间曲面薄板回弹的预测。

1 基于最小能量原理求解应变

螺旋叶片是复杂三维非规则曲面,能作为复杂空间曲面薄板的代表,故本文以螺旋叶片为对象,介绍能量法并证明其有效性。

在求解曲面应变前先作如下简化及假设^[5]:①薄板沿厚度方向各层的应变都等于中性层的应变,故选取中性层曲面研究即可;②材料不可压缩,即变形过程中体积不变;③切向剪应力可以忽略;④材料的变形满足塑性形变理论;⑤材料是非线性硬化的,应力-应变关系采用 Khan-Huang 本构模型描述。

1.1 薄板变形能

螺旋叶片中性层是复杂空间曲面,用单一数学函数对整个曲面描述很困难。 B 样条曲面在这方面具有一定的优势,能够表达任意复杂的几何曲面,故叶片曲面用 B 样条法表示, B 样条曲面一般形式可表示为^[7]

$$w(u,v) = \sum_{i=1}^{mu} \sum_{j=0}^{mv} B_{i,su}(u) B_{j,sv}(v) S_{i,j} \tag{1}$$

式中: u 为周向; v 为径向; $B_{i,su}(u)$ 、 $B_{j,sv}(v)$ 分别为 u 、 v 方向 B 样条基函数,分别由 u 、 v 方向的幂次 su 、 sv 和节点矢量 \mathbf{KU} 、 \mathbf{KV} 确定; $S_{i,j}$ 为曲面控制顶点。

控制顶点可通过将节点(型值点)笛卡尔坐标代入式(2)求得

$$\begin{bmatrix} S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ \vdots \\ S_{n-1} \\ S_n \\ S_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 & -3 & & & \\ 1/4 & 7/12 & 1/6 & & \\ & 1/6 & 2/3 & 1/6 & \\ & & & & \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 & & \\ & 1/6 & 7/12 & 1/4 & \\ & & -3 & 9 & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 6P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_{n-2} \\ P_{n-1} \\ 6P_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$S_1 = P_1, \quad S_{n+2} = P_n \quad (3)$$

式中: S_i 为控制顶点; P_i 为节点(型值点); $i = 1, 2, \dots, n$ 。

薄板变形能函数可表示为^[8-10]

$$E_{\text{surface}} = \iint [\alpha(w_{uuu}^2 + 3w_{uuv}^2 + 3w_{uvv}^2 + w_{vvv}^2) + \beta(w_{uu}^2 + 2w_{uv}^2 + w_{vv}^2) + \gamma(w_u^2 + w_v^2)] dudv \quad (4)$$

式中: w_u 、 w_v 、 w_{uu} 、 w_{uv} 、 w_{vv} 、 w_{uuu} 、 w_{uuv} 、 w_{uvv} 、 w_{vvv} 分别为曲面沿周向和径向的一阶、二阶和三阶偏导矢; w_{uv} 、 w_{uuv} 、 w_{uvv} 分别为二阶、三阶混合偏导矢; α 、 β 、 γ 为材料特性参数, 决定物体抵抗变形的能力。

1.2 应变求解

为了得到薄板冲压后对应节点的位置(图1), 需要借助薄板变形能方程。

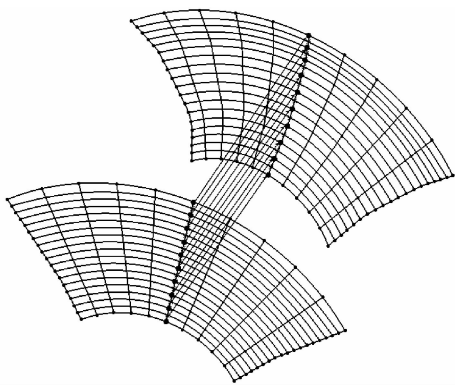


图1 平面节点到曲面节点的映射

Fig. 1 Mapping from plane's nodes to curved surface's nodes

设回弹前 B 样条曲面表达式为 $w(u, v)$, 则若已知某点参数为 (u_{ij}, v_{ij}) , 则将参数 (u_{ij}, v_{ij}) 代入 $w(u, v)$, 就能知道该点在笛卡尔坐标系下的三维坐标 $(x(u_{ij}, v_{ij}), y(u_{ij}, v_{ij}), z(u_{ij}, v_{ij}))$ 。

设毛坯上的直线 AB (图2) 冲压后在曲面上映射曲线 $A'B'$ 参数方程为 $v = f(u)$, 曲线方程表达式的求解在后文讲述, 这里暂且将其当做已知条件。若设节点周向参数为 u , 则径向参数为 $v = f(u)$ 。将平面到曲面的映射节点(图1) 用参数 u 、 $f(u)$ 表示, 曲面 w 用映射节点对应的控制顶点表示, 则曲面变形能是参数 u 的表达式^[9-10]。

曲面真实应变的表达式为^[11]

$$\epsilon_{ij} = \ln(P_{ij}/l_{ij}) \quad (5)$$

式中: l_{ij} 为平面网格节点的原始距离; P_{ij} 为曲面对应网格节点之间的距离。

真实应变也是参数 u 的表达式。根据最小能量原理, 在所有满足几何形变的应变中, 只有使系统总变形能 U 最小的应变才是真实应变, 因而总变形能

对各应变的偏微分应该为0, 即有^[3]

$$\frac{\partial U}{\partial \epsilon_{ij}} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: m 、 n 分别为曲面沿周向、径向的等分数。

根据式(6) 就能求解各曲线段应变。

2 映射曲线的求解

2.1 确定起点、终点

图2的左边为叶片毛坯, 右边为叶片曲面。现追踪毛坯平面冲压成曲面后, 毛坯某截面线在曲面上对应的曲线, 即得到平面与曲面节点之间的映射关系。现以平面上截面线 AB (图2) 为例, 求解曲线 $A'B'$, 曲面上 A' 、 B' 点位置按弧长关系确定。

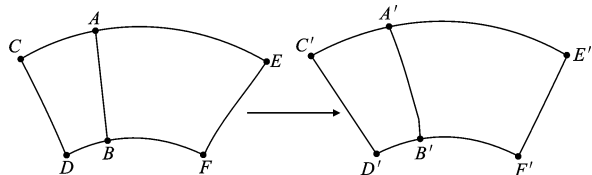


图2 直线 AB 从平面到曲面的映射

Fig. 2 Mapping of line AB from plane to curved surface

即 A' 、 B' 可表示为

$$\begin{cases} \widehat{CA'} = \widehat{CE} \frac{\widehat{CA}}{\widehat{CE}} \\ \widehat{DB'} = \widehat{DF} \frac{\widehat{DB}}{\widehat{DF}} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 基于粒子群优化算法求解最短路径

$A'B'$ 点位置确定后, 确定直线 AB 与曲线 $A'B'$ 的映射关系就等价于在叶片曲面上寻找1条从 A' 到 B' 的路径。从 A' 到 B' 沿曲面有无数条路径, 而只有1条路径才是真实路径。根据最小能量原理, 曲线的每一微段应变都是取所有可能取值中的最小值, 故曲线 $A'B'$ 是从 A' 到 B' 的最短路径。则求解毛坯上直线 AB 到叶片曲线 $A'B'$ 的映射, 等价于求解从起始点 A' 到终点 B' 的最短路径。本文采用粒子群优化算法求解最短路径。

采用粒子群优化算法求解曲面上任意两点之间最短距离, 关键在于建立一个可执行的目标函数来构成迭代步骤, 也就是将所求的曲面路径问题转换为最值问题^[12]。由于曲面上两点之间的连线有无数条, 因此, 在考虑与粒子群优化算法的结合中, 将每条连线可以看作是1个粒子。设有 N 条连线, 则粒子数目为 N 。若想求解曲面上两点之间的路径长度, 最简单的方法是将这条曲线 D 等份, 将每条线分成的份数看作是粒子的维数, 每一曲线段

近似用弧长表示,然后求解每一曲线段的弧长长度,最后求和,建立曲线路径长度的目标函数。求解目标函数的最小值作为最优解。

粒子群优化算法实现步骤:

(1)粒子群位置、速度、适应度函数编码;

(2)初始化粒子群,即确定粒子群的规模,每个粒子的初始位置 X_0 和速度 V_0 ,并确定粒子初始的个体极值和全局极值;

(3)确定每个粒子的适应度值 F_i ;

(4)对于每个粒子,用适应度值 F_i 和其个体极值 P_i (全局极值 g) 进行比较,如果适应度值 F_i 大于其个体极值 P_i (全局极值 g),则将其个体极值 P_i (全局极值 g) 替换为适应度值 F_i ;

(5)更新每个粒子的位置和速度;

(6)判断是否达到最大迭代次数,如果满足就退出程序,否则返回步骤(3)。

位置和速度更新迭代方程为^[12]

$$\begin{cases} v_i = \omega v_i + c_1 r_1 (p_i - x_i) + c_2 r_2 (g - x_i) \\ x_i = x_i + v_i \end{cases}$$

式中: ω 为非负数,表示惯性权值,取 1.05; c_1 、 c_2 为非负常数,称为加速因子,均取 2; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机值。

借助于 MATLAB 的粒子群优化算法工具箱实现粒子群算法,其调用格式为^[12]

$$[x_m, f_v] = \text{PSO}(@\text{fitness}, N, C_1, C_2, \omega, M, D, x_0, x_n, y_0, y_n, x_c, y_c, x_d, y_d)$$

式中: x_m 为目标函数取极值时对应的自变量值; f_v 为目标函数最小值;fitness 为目标函数名; N 为粒子的个数; C_1 、 C_2 为算法的学习因子; M 为粒子的迭代次数; D 为粒子的维数; x_0 、 y_0 和 x_n 、 y_n 分别为起始点和终点的相应周向、径向参数; x_c 、 y_c 和 x_d 、 y_d 分别为辅助点 c 、 d 点的相应周向、径向参数。

3 回弹预测

设已求得各节点应力应变,弹性应变记为 ϵ_e 。则根据塑性变形理论,弹性应变表达式为^[3]

$$\begin{cases} \epsilon_{e1} = (\sigma_1 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_3)/E \\ \epsilon_{e2} = (\sigma_2 - \nu\sigma_1 - \nu\sigma_3)/E \\ \epsilon_{e3} = (\sigma_3 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_1)/E \end{cases} \quad (8)$$

式中: ν 为泊松比; E 为弹性模量; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为周向应力、径向应力、法向应力; ϵ_{e1} 、 ϵ_{e2} 、 ϵ_{e3} 分别为沿 x 、 y 、 z 方向的弹性应变。

由第 1 节的假设②得^[6]

$$\epsilon_m = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/3 = 0$$

$$\text{而 } \sigma_m = \frac{E}{1-2\nu}\epsilon_m, \text{ 故 } \sigma_m = 0$$

$$\text{又 } \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$$

$$\text{故 } \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$$

所以式(8)可以简化为

$$\begin{cases} \epsilon_{e1} = \frac{1+2\nu}{E}\sigma_1 \\ \epsilon_{e2} = \frac{1+2\nu}{E}\sigma_2 \\ \epsilon_{e3} = \frac{1+2\nu}{E}\sigma_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中: ϵ_m 、 σ_m 分别为平均应变和平均应力。

根据塑性变形理论,等效应变 ϵ_e 为^[3]

$$\epsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}$$

故等效弹性应变 ϵ_{te} 为

$$\epsilon_{te} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_{e1} - \epsilon_{e2})^2 + (\epsilon_{e1} - \epsilon_{e3})^2 + (\epsilon_{e2} - \epsilon_{e3})^2} \quad (10)$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 分别为周向应变、径向应变、法向应变。

将式(9)代入式(10)得

$$\epsilon_{te} = \frac{\sqrt{2}(1+2\nu)}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (11)$$

而各应力应变分量关系为^[3]

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\epsilon_e} \epsilon_1 - \sigma_m \\ \sigma_2 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\epsilon_e} \epsilon_2 - \sigma_m \\ \sigma_3 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\epsilon_e} \epsilon_3 - \sigma_m \end{cases} \quad (12)$$

将 $\sigma_m = 0$ 代入式(12),并将式(12)代入式(11)有

$$\epsilon_{te} = \frac{1+2\nu}{E} \frac{2}{3} \sigma_e$$

根据第 1 节假设⑤^[6],有

$$\sigma_e = k_1 \epsilon_e^{m_1} + k_2 \exp(m_2 \epsilon_e) \quad (13)$$

$$\epsilon_{te} = \frac{1+2\nu}{E} \frac{2}{3} [k_1 \epsilon_e^{m_1} + k_2 \exp(m_2 \epsilon_e)] \quad (14)$$

式中: k_1 、 k_2 、 m_1 、 m_2 均为材料常数; σ_e 为等效应力。

若将曲线划分得足够细,则由式(5)得到的应变即为等效应变,由式(5)和式(14)就能求出各微曲线段的回弹量。

4 曲线段拼接

前面已求得各微曲线段回弹量,只要曲线段取得足够细,其回弹方向即为节点连线方向。回弹后曲线可由各微曲线段拼接得到。拼接过程为:将微

曲线段平移,使曲线段前后相接;在将曲线段随端点处坐标系对齐过程中变换坐标。现以微曲线段 AB 和 BC 的拼接为例,如图 3 所示,曲线段 AB 回弹后变为 AB' , AB 与 BC 不再相接。在点 B' 、 B 处分别建立笛卡尔坐标系。坐标系各轴方向如下:沿曲面法向 n 建立 Z 轴,沿曲线切线建立 Y 轴,在与 Z 轴、 Y 轴垂直方向建立 X 轴^[13]。

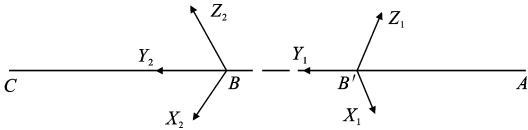


图 3 直线段的拼接
Fig. 3 Splicing straight lines together

设坐标系 1 相对于坐标系 2 的坐标矢量为 $B'X_1=(u_{X_1},u_{X_2},u_{X_3}),B'Y_1=(u_{Y_1},u_{Y_2},u_{Y_3}),B'Z_1=(u_{Z_1},u_{Z_2},u_{Z_3}),BB'=(\Delta d_X,\Delta d_Y,\Delta d_Z)$ 。
式中: $u_{X_i},u_{Y_i},u_{Z_i}(i=1,2,3)$ 分别为坐标系 1 相对于坐标系 2 的坐标矢量沿 X 、 Y 、 Z 方向的分量; $\Delta d_X,\Delta d_Y,\Delta d_Z$ 分别为 BB' 沿 X 、 Y 、 Z 方向的分量。

平移微曲线段 BC 对应的矩阵 T 为^[13-14]

$$T=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\Delta d_X & -\Delta d_Y & -\Delta d_Z & 1 \end{bmatrix}$$

旋转 BC 对应的矩阵 R 为^[13]

$$R=\begin{bmatrix} u_{X_1} & u_{Y_1} & u_{Z_1} & 0 \\ u_{X_2} & u_{Y_2} & u_{Z_2} & 0 \\ u_{X_3} & u_{Y_3} & u_{Z_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则 BC 与 AB 拼接对应的坐标变换公式为 $(X_1,Y_1,Z_1,1)=(X_2,Y_2,Z_2,1)TR$ (15)

对所有微曲线段进行同样的操作就完成了曲线的拼接过程,再拟合曲线就能得到回弹后的曲面。

5 计算和验证

螺旋叶片所使用材料为 Qste420T,该材料应力应变曲线如图 4 所示,主要性能参数见表 1^[15]。

5.1 能量法预测回弹量

为了实现上述算法,必须借助于 MATLAB 编程。其具体实现步骤如下所述^[16]。

步骤 1:将回弹前曲面用 B 样条法表示,得到曲面网格点的坐标。

步骤 2:将毛坯内外侧边界线 n 等分,得到一系列等分点;根据式(7)得到毛坯上等分点在曲面上的映射。

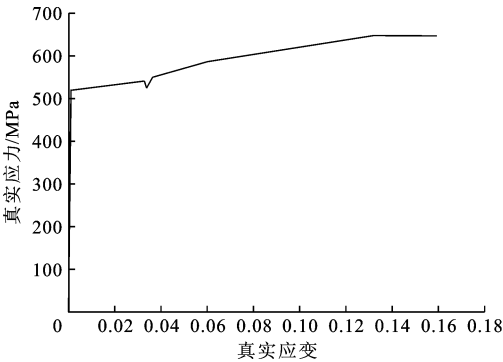


图 4 材料 Qste420T 的真实应力应变曲线
Fig. 4 True stress strain curve of material of Qste420T

表 1 Qste420T 材料性能参数

Tab. 1 Properties parameters of material of Qste420T			
弹性模量 E/GPa	线硬化模量 E_p/GPa	屈服强度 Y/MPa	泊松比 ν
184	0.71	520	0.3

步骤 3:将曲面外边界线上第 i 个映射点作为起点,曲面内边界上第 i 个映射点作为终点;调用粒子群算法主程序,求起点到终点的最短路径。

步骤 4: $i=i+1$;如果 $i\leq n+1$,则返回步骤 3,继续求解最短路径;如果 $i>n+1$,则转入步骤 5。

步骤 5:引入曲面节点坐标的未知参数,代入式(2)求解得到带未知参数的曲面控制顶点,将控制顶点代入式(1)得到曲面表达式 $w(u,v)$,将 $w(u,v)$ 代入式(4)求解得到曲面变形能函数^[17]。

步骤 6:由式(5)求解得到由未知参数表示的各节点应变量。

步骤 7:求解式(6)得到各节点参数值,并由式(14)得到各节点弹性应变。

步骤 8:由式(15)将回弹后各微曲线段拼接得到回弹后曲线,并将曲面线拟合成曲面,此曲面即为回弹后曲面^[18]。

现以毛坯上等分点连线 AB (图 1)为例,求解回弹后曲线 $A'B'$ 。

直线 AB 映射曲线 $A'B'$ 见图 5,回弹后曲线见下页图 6,回弹后曲线拟合曲面见下页图 7。

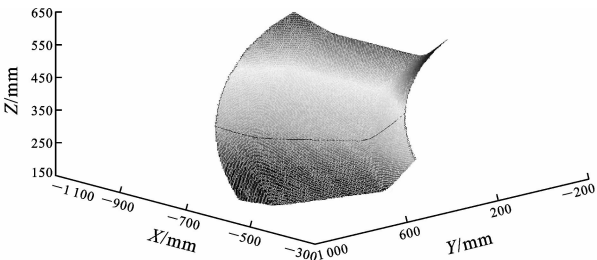


图 5 从 A' 到 B' 的最短路径
Fig. 5 Shortest path from A' to B'

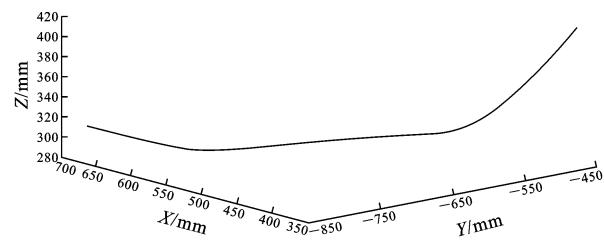


图 6 回弹后拟合曲线 $A''B''$

Fig. 6 Fitting curve after springback of $A''B''$

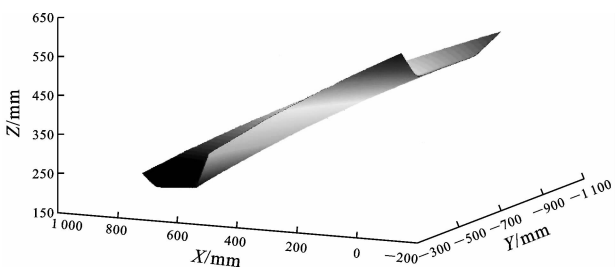


图 7 回弹后曲面

Fig. 7 Curved surface after springback

回弹前后边界线对比如图 8 所示。其中带两撇的字母表示回弹后边界线端点,带一撇的字母表示回弹前边界线端点;虚线表示回弹前边界线,实线表示回弹后边界线^[19]。

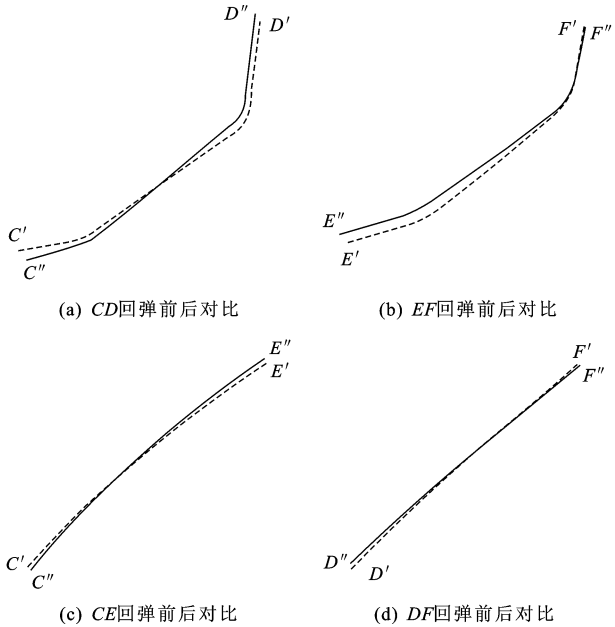


图 8 曲面边界线回弹前后对比

Fig. 8 Comparison on curved surface boundaries before and after springback

5.2 试验测量结果

冲压试验设备见图 9,冲压得到的叶片见图 10。将冲压后的叶片用三坐标测量仪测试得到冲压叶片的点云数据,用弦高差法过滤噪音点,再由点云数据拟合曲面,将点云拟合得到的叶片与理想叶片 CAD



图 9 冲压模具

Fig. 9 Stamping tool

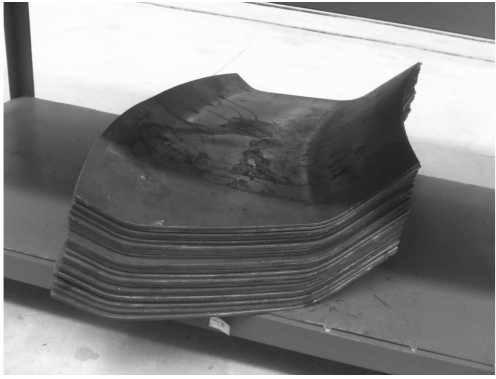


图 10 冲压叶片

Fig. 10 Stamping blade

模型对齐后比较就能得到冲压叶片的实际回弹量。冲压叶片点云与理想叶片模型对比见图 11,两者对应节点的距离就是回弹量。

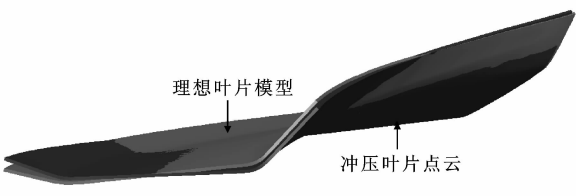


图 11 实际叶片与理想叶片对比

Fig. 11 Comparison on ideal and actual blade

5.3 回弹量对比

将能量法、试验法(真实回弹量)得到的各节点回弹量用插值法拟合成曲线,就能得到 2 种方法的回弹量对比图。边界线各节点处回弹量对比见下页图 12,其中边界线均 20 等分,对应节点参数从 0 到 20。正负规定为:若回弹方向与 Z 轴正向夹角为锐角,则叶片回弹量为正;若回弹方向与 Z 轴正向夹角为钝角,则叶片回弹量为负。因叶片可通过以曲线 CD 为起始截面、 EF 为终止截面,以非等变角对

数螺旋线 CE 、 DF 为引导线扫描得到,故叶片回弹量可通过边界线 CD 、 EF 、 CE 、 DF 处的回弹量来表征。

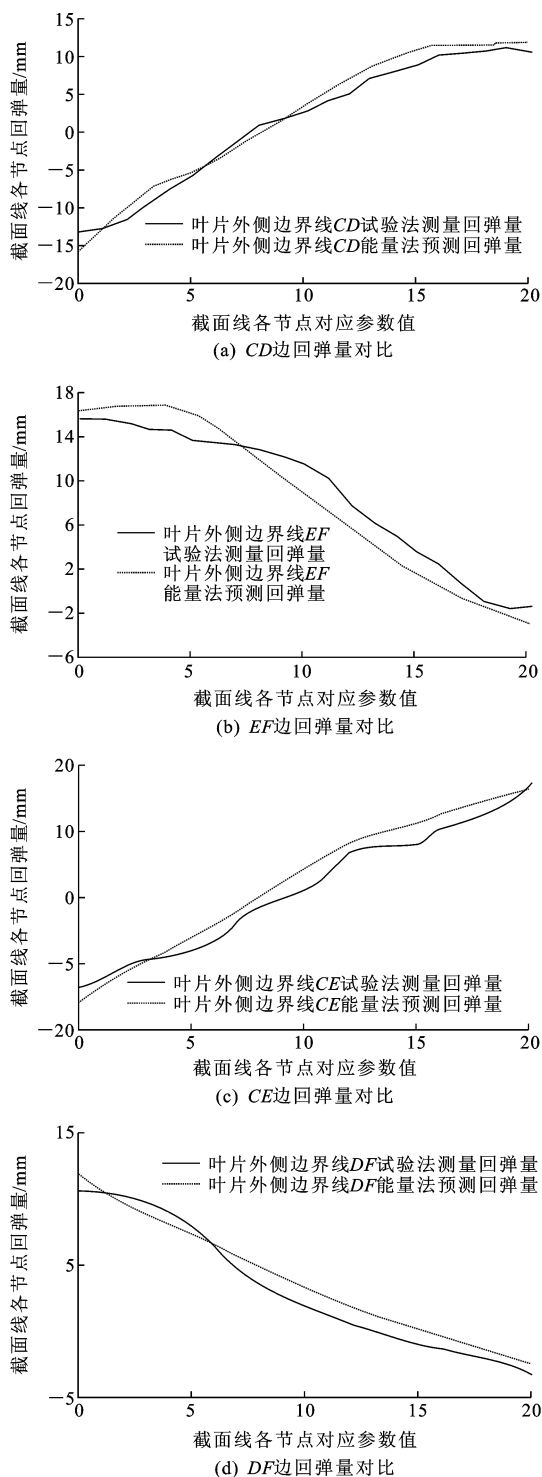


图12 试验法、能量法预测回弹量的对比

Fig. 12 Comparisons on springbacks predicted by methods of experiment and energy

从图12可以看出:能量法回弹预测误差大多在2 mm范围内,最大预测误差为3.2 mm。而混凝土

搅拌车螺旋叶片焊接装配误差允许范围为5 mm,预测误差在允许误差范围内。故能量法能较准确地预测混凝土搅拌车螺旋叶片的回弹。

6 结 语

(1)提出了基于薄板能量函数的半解析半数值的复杂空间曲面薄板冲压成形回弹预测算法,并利用试验对比分析得到能量法的预测误差,分析结果表明:能量法能较准确地预测复杂空间曲面薄板冲压回弹量的大小;该方法较现行的数值模拟法具有操作简单、计算速度快等优点,故能量法预测回弹量具有一定的工程意义^[20]。

(2)能量法仍然无法避免产生误差,误差的产生很大程度上是因为能量函数未能与实际冲压时的工艺参数联系起来,如能将薄板冲压工艺参数考虑进来,则能更精确地预测薄板回弹量的大小。

(3)在某些要求不是特别精密的场合,如混凝土搅拌车螺旋叶片,本文算法得到的模面可以作为最终模面;在要求更精密的场合,如允许误差在3 mm范围内,则需要根据试验结果做进一步的修正。

参考文献:

References:

- [1] 王安麟,虞晓华,王剑皖,等.混凝土流场的简化拟流固两相模型[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009,37(2):182-186.
WANG An-lin, YU Xiao-hua, WANG Jian-wan, et al. Simplified numerical simulation in concrete multi-phase mixing drum based on quasi-fluid-solid two-fluid model[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(2): 182-186. (in Chinese)
- [2] 侯志刚.薄板结构焊接变形的预测与控制[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
HOU Zhi-gang. Prediction and control of welding deformation of sheet structures[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [3] XUE P, YU T X, CHU E. An energy approach for predicting springback of metal sheets after double-curvature forming, part I: axisymmetric stamping[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(8): 1893-1914.
- [4] XUE P, YU T X, CHU E. An energy approach for predicting springback of metal sheets after double-curvature forming, part II: unequal double-curvature forming[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(8): 1915-1924.

- [5] 周 驰,刘 强,阮 锋.一种基于能量法的冲压回弹预测补偿算法[J]. 塑性工程学报,2008,15(2):131-135.
ZHOU Chi,LIU Qiang,RUAN Feng. An energy approach for stamping springback prediction and compensation[J]. Journal of Plasticity Engineering,2008,15(2):131-135. (in Chinese)
- [6] 廖 娟,周 驰,阮 锋.高强度钢板在双向等曲率模中的成形回弹研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(6):1629-1635.
LIAO Juan,ZHOU Chi,RUAN Feng. Study on springback of high strength steels deformed in equal doubly-curved die[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2011,42(6):1629-1635. (in Chinese)
- [7] 朱心雄.自由曲线曲面造型技术[M].北京:科学出版社,2000.
ZHU Xin-xiong. Free curves and surfaces modeling technology [M]. Beijing: Science Press,2000. (in Chinese)
- [8] WELCH W, WITKIN A. Variational surface modeling[J]. ACM Siggraph Computer Graphics,1992,26(4):157-166.
- [9] LIU X D. Designing *B*-spline surfaces with haptics based on variational technique[J]. Computer-Aided Design and Applications,2014,11(4):369-380.
- [10] LIU X D. Filling *N*-sided holes using trimmed *B*-spline surfaces[C]//ASME. 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Chicago:ASME,2012:611-618.
- [11] 牟伟强,李 原,张开富,等.无头铆钉压铆力数学建模与仿真分析[J]. 西北工业大学学报,2010,28(5):742-747.
MU Wei-qiang,LI Yuan,ZHANG Kai-fu,et al. Mathematical modeling for and simulation analysis of flush rivet pressing force [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2010,28(5):742-747. (in Chinese)
- [12] 荣金方.曲面测地与短程路径的分析和提取[D].沈阳:东北大学,2010.
RONG Jin-fang. Analysis and extraction of geodesic curve in curved surface[D]. Shenyang:Northeastern University,2010. (in Chinese)
- [13] 吴 磊.高强度钢板扭曲回弹特性及控制方法研究[D].长沙:湖南大学,2010.
WU Lei. Characters and control methods of torsion springback in HSS stamping[D]. Changsha: Hunan University,2010. (in Chinese)
- [14] 廖 娟.基于光学测量的曲面冲压件回弹离散补偿算法研究[D].广州:华南理工大学,2011.
LIAO Juan. A discrete springback compensation algorithm for stampings with curved surfaces using optical measuring technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2011. (in Chinese)
- [15] 李雪春,杨玉英,包 军,等.弹性模量与塑性变形关系的探讨[J]. 哈尔滨工业大学学报,2000,32(5):54-56.
LI Xue-chun,YANG Yu-ying,BAO Jun,et al. Relationship between elastic modulus and plastic deformation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2000,32(5):54-56. (in Chinese)
- [16] 朱 寅.冲压件回弹预测和补偿的解析解法研究[D].广州:华南理工大学,2011.
ZHU Yin. The analytical method of stamping springback prediction and compensation[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2011. (in Chinese)
- [17] 李宗成,金康宁,刘春洋.能量优化法分析四边域膜结构初始形态[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2002,19(3):1-3.
LI Zong-cheng,JIN Kang-ning,LIU Chun-yang. Form finding of membrane structures by energy optimization method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Urban Science Edition,2002,19(3):1-3. (in Chinese)
- [18] GAU J T, KINZEL G L. An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions[J]. Journal of Materials Processing Technology,2001,108(3):369-375.
- [19] KIM J K, THOMSON P F. Springback and side-wall curl of galvanized and galvalume steel sheet[J]. Journal of Mechanical Working Technology,1989,19(2):223-238.
- [20] LIVATYALI H, WU H C, ALTAN T. Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer-aided design methods; part 2: FEM predictions and tool design[J]. Journal of Materials Processing Technology,2002,120(1/3):348-354.