

基于模拟退火的覆盖件回弹预测

李富柱¹ 郭玉琴¹ 王小椿² 宋 维³

(1. 徐州师范大学工学院 徐州 221011; 2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049;

3. 海军航空工程学院机械工程系 烟台 264001)

摘要：从能量逐渐降低使物质系统向新的平衡状态转移的观点出发，根据覆盖件冲压成形后回弹过程与金属退火过程的强烈相似性，提出用模拟退火法对覆盖件进行回弹预测的思想。设计出一种混合模拟退火算法(BFGS-SA)用于解决设计变量数目较多的覆盖件回弹预测问题，该算法将变尺度的局部优化法(Broyden fletcher goldfarb shann, BFGS)与模拟退火法(Simulated annealing, SA)相结合，充分发挥前者局部寻优能力较强、计算效率高、编程简单以及后者通用性好、容易跳出局部最优陷阱以获得高精度全局最优解的优势。并建立相应的优化模型和退火控制策略。通过对实例仿真计算结果与实际测量结果的比较，验证了所提出回弹预测方案的合理性及回弹预测算法的有效性。

关键词：覆盖件 回弹预测 模拟退火 退火控制策略

中图分类号：TG386.41

0 前言

在大型复杂覆盖件成形数值模拟技术中，对回弹量的精确预测因为涉及到材料性质(包括各向异性行为、弹塑性本构关系、加工硬化模式及包辛格效应等)、冲压方式、工艺条件、加载历史、冲压件几何形状及回弹预测理论与方法等众多因素的综合影响，一直是该领域最难解决的问题之一，主要体现在回弹预测精度与效率不能令人满意，已经成为影响模具设计及制造质量、制约产品生产成本降低及生产周期缩短的重要因素^[1-4]。这里将基于动力显式非线性有限元法的成形仿真与模拟退火的回弹预测相结合，即：将材料的各向异性行为、弹塑性本构关系、包辛格效应、凹模型腔几何形状及入口圆角半径、拉延筋尺寸及布局等因素在板料成形阶段通过动力显式有限元数值计算予以考虑，而将覆盖件成形后从脱模开始到最终回弹结束的整个回弹过程作为与固体物质退火相类似的过程进行处理，用文中所提出的将模拟退火(Simulated annealing, SA)这种随机全局优化算法与传统变尺度的局部优化方法(Broyden fletcher foldfarb shann, BFGS)相结合的混合模拟退火算法(BFGS-SA)进行覆盖件成形后的回弹预测，旨在充分发挥 BFGS 算法局部寻优能力强、速度快、编程简单且适于解决设计变量维数大于 100 的大规模优化问题的优势以改善 SA 算法的求解效率及精度。通过对实例零件回弹预测结果与

试验结果的比较，验证了所提出回弹预测方案及 BFGS-SA 回弹预测方法的合理性与有效性。

1 回弹预测思路的提出

假设用于覆盖件成形仿真的有限元模型考虑了材料的各向异性屈服行为以及包辛格效应，将冲压成形仿真终了时刻的应力应变状态作为回弹过程的起始状态，并记该时刻各结点的坐标位置、位移、应力、应变矢量及最终屈服应力分别为 x_0 、 u_0 、 s_0 、 e_0 和 s_y ，则可用第 3 节提出的 BFGS-SA 混合模拟退火算法来计算回弹量。

用模拟退火算法进行回弹预测的思想源于物理退火过程与覆盖件成形及回弹过程的强烈相似性，即：从系统能量变化角度来讲，覆盖件冲压成形的“冲压 - 回弹”过程分别对应于物理退火过程中的“升温 - 降温”过程。仅从降温过程来看，其共同特点是随着温度的降低或退火时间的增加(对应于冲头行程的减小或回弹时间的增加)，系统中能量逐渐减小(对应于因弹性应变的恢复使变形体内变形能降低)，当温度降至室温时(对应于冲头行程减小至零或回弹过程结束时)，系统处于能量最低的平衡状态(对应于变形体中各单元的残余应变能差最小，即各单元中应变能分布最均匀)。故结合回弹预测问题的具体特点，以有限元仿真分析结果为前提，将回弹预测问题归结为求解一个多维组合优化问题来处理(优化模型见第 2 节)，并以目前处理该类问题较为有效的模拟退火算法为核心，提出将 SA 这种随

机全局优化算法与传统的变尺度 BFGS 局部优化方法相结合的 BFGS-SA 混合模拟退火算法用于解决回弹预测问题，利用后者搜索速度快、局部寻优能力强、编程简单且适于解决 $N > 100$ 的大规模优化问题的特点，充分发挥了 SA 算法以概率收敛到全局最优的优势^[5-6]，且通过加入“记忆器”以提高求解精度。

2 回弹预测模型的建立

设覆盖件成形过程中体积不可压缩，且有限元模型用三结点或四结点壳单元对坯料进行网格划分，则各单元插值函数 $N_i(\mathbf{x}, \mathbf{h})$ 已知。在此基础上假设卸载回弹过程中各结点产生的位移增量 $\Delta \mathbf{u}$ 与应变增量 $\Delta \mathbf{e}$ 及其与应力增量 $\Delta \mathbf{s}$ 之间的关系符合线弹性几何及物理关系，则有

$$\Delta \mathbf{e} = \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad \Delta \mathbf{s} = \mathbf{D} \Delta \mathbf{e}$$

式中 $\Delta \mathbf{u} = \sum_{i=1}^{n_c} N_i(\mathbf{x}, \mathbf{h}) \Delta u_i$
 Δu_i ——单元结点位移增量
 n_c ——单元结点数
 \mathbf{B} ——单元应变矩阵
 \mathbf{D} ——材料弹性矩阵

则回弹后变形体中各点的残余应力矢量 \mathbf{s}_r 及残余应变矢量 \mathbf{e}_r 分别为

$$\mathbf{s}_r = \mathbf{s}_0 - \Delta \mathbf{s} \tag{1}$$

$$\mathbf{e}_r = \mathbf{e}_0 - \Delta \mathbf{e} \tag{2}$$

若 $E_{r,e}(\Delta \mathbf{u}) = \mathbf{e}_r^T \mathbf{s}_r / 2$ 为回弹后某单元的单位体积应变能， $\bar{E}(\Delta \mathbf{u})$ 为回弹后所有单元的平均应变能密度，则回弹结束后变形体处于最低能量平衡状态可用表示各单元应变能分布最均匀的函数 $F(\Delta \mathbf{u})$ 来描述，设回弹过程中各结点位移增量 $\Delta \mathbf{u}$ 为设计变量 \mathbf{x} ，以为了消除变形体刚体位移而在指定点施加的位移约束为约束条件，建立优化模型如下

$$\min F(\mathbf{x}) = \sum_{e=1}^N [E_{r,e}(\mathbf{x}) - \bar{E}(\mathbf{x})]^2 \tag{3}$$

s.t. $\mathbf{x}_c = \mathbf{0}$

式中 N ——单元数
 \mathbf{x}_c ——限制覆盖件因回弹而产生刚体位移所施加的单元位移约束矢量

3 BFGS-SA 混合模拟退火算法

BFGS-SA 算法采用以下的退火控制策略。

(1) 确定初始温度。取覆盖件冲压加工终了时冲头最大行程 d_{\max} 为初始温度，即

$$\mathbf{q}_0 = d_{\max}$$

(2) 降温策略。采用文献[7]中提出的降温策略： $\mathbf{q}_k = \mathbf{a}_k \mathbf{q}_{k-1}$ ，其中 \mathbf{q}_k 为第 k 次迭代的温度控制参数， $\mathbf{a}_k = (1-1/k)^m$ 为第 k 次迭代时的温度衰减系数，且 $k=1$ 时 $\mathbf{a}_1 = 1$ ，指数 m 用于从整体控制温度的下降速度，取 $m = 2$ 。

(3) 马尔可夫链长度的确定。文献[8]确定马尔可夫链长 $L_d = 10 \times N$ ， $N = 3n_n - 6$ 是消除刚体位移后设计变量的自由度数， n_n 为单元结点总数。

(4) 新解产生函数。取 $x_i = x_{i-1} + (0.5 - \mathbf{h}) \times 2 \times \mathbf{b}_i \times |x_{i-1}|$ 为新解产生函数，其中 x_i 为某温度控制参数下第 i 个试验点的分量， $\mathbf{h} = \text{rand}(0,1)$ 为 $[0,1]$ 区间的随机数， \mathbf{b}_i 取与第(2)步中 \mathbf{a}_k 相同的值，在 \mathbf{q}_k 相同时其值不变。

(5) 新解接受函数。采用 Metropolis 准则作为新解接受/舍弃的依据，即计算 $P = \min(1, \exp(-\Delta F / T))$ ，如果 $P < \mathbf{h}$ ，则接受新解为当前解，否则舍弃该解。其中 ΔF 为新试验点与当前解所对应的目标函数之差， $T = \mathbf{q}_k$ 为当前温度控制参数。

(6) 终止准则。根据所研究问题的具体情况，采用准则 1

$$\mathbf{q}_k = \mathbf{e}_1$$

和准则 2

$$\left| \frac{F_k^* - F_{k-1}^*}{F_k^*} \right| = \mathbf{e}_2$$

的双重终止准则，即当准则 1 和 2 同时满足时，算法终止。其中准则 1 的含义是当温度控制参数(冲头行程)小于规定的允许值 \mathbf{e}_1 时，算法终止；而准则 2 表示当相邻两次降温过程所求得的目标函数 F_{k-1}^* 、 F_k^* 之间的相对误差小于某一非常小的正数 \mathbf{e}_2 时算法终止，取 $\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_2 = 10^{-6}$ 。

BFGS-SA 算法实现流程图见图 1 所示。

4 实例仿真及结果分析

用所提出的回弹预测方法对图 2 所示的拉深件成形、切边后的回弹量进行预测。所用材料牌号为 1Cr18Ni9Ti 的不锈钢，其主要参数为：硬化系数为 554.3 MPa、硬化指数为 0.195、屈服强度为 205 MPa。

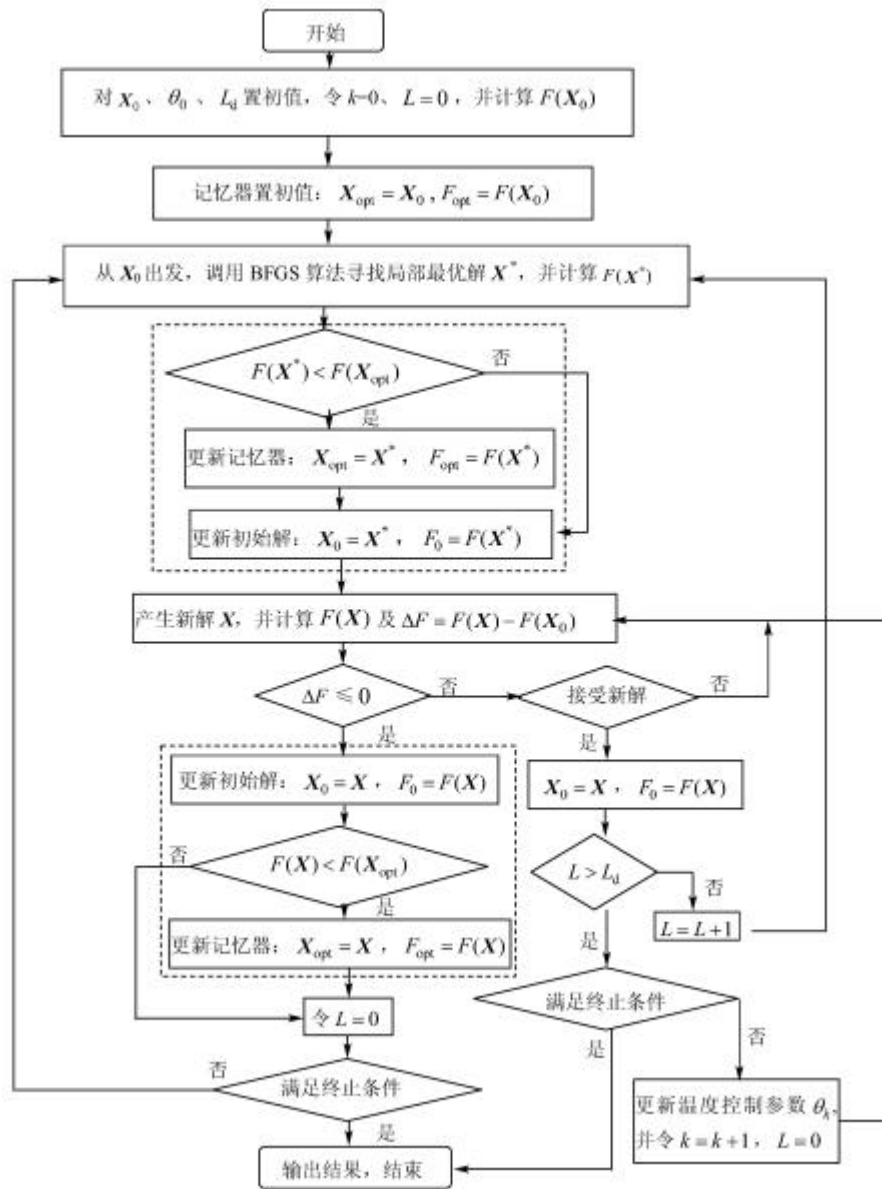


图 1 BFGS-SA 算法流程框图



图 2 回弹预测拉深件图

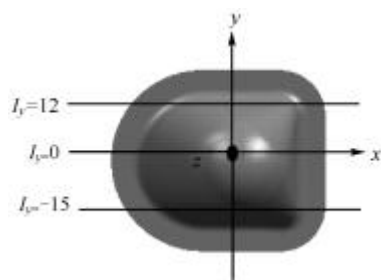


图 3 测量断面定义图

为便于对回弹预测结果进行分析，在零件上建立如图 3 所示的局部坐标系，并取平行于 Oxz 的坐标平面 $I_y = -15$ 、 $I_y = 0$ 、 $I_y = 12$ 作为截平面。然后以这些截平面与零件截交线上的点作为回弹预测的分析、评价点，并将测点在回弹前、后沿截交线的法向最短距离作为回弹量 Δh 的定义。该算例通过在 MATLAB6.5 中编程，运行约 868 s，所得各断面上的回弹预测结果与实际测量结果比较分别如图

4 所示。

通过算例实现及图 4 中各指定断面上回弹预测结果与实际测量结果比较，可以看出所提出的回弹预测方法能够较好地反映零件在各断面上回弹量大小的走向，从而可对零件不同位置的回弹情况做

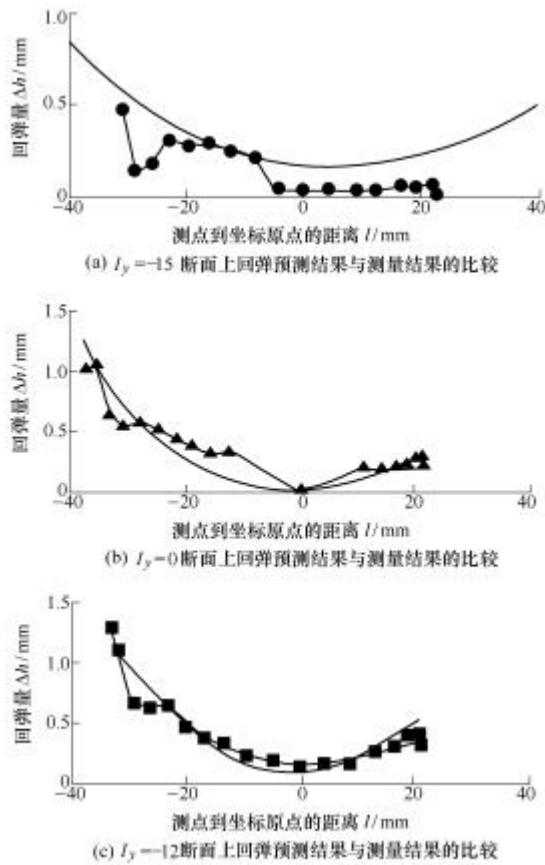


图4 指定断面上回弹预测结果与测量结果的比较
——预测结果, 测量结果

出定性分析。如：在各指定断面上，回弹量的值随着测量点到坐标原点距离的增加而呈现总体上升趋势，且在同一断面线上，最左端的回弹值明显大于最右端的回弹值。此外，在 $I_y=0$ 、 $I_y=12$ 断面上，得到的最大回弹值分别为1.248 1、1.145 9 mm，与实际测量值相比，最大预测误差不超过0.238 6 mm、0.296 mm，而 $I_y=-15$ 断面上的预测误差则相对较大，这很可能是由于受测量条件限制而在相应断面上靠近两端处测量误差较大而引起的。

5 结论

从回弹过程中能量逐渐减小以使系统达到新的平衡状态的特点出发，根据板料冲压成形及回弹过程与金属退火过程的强烈相似性，提出用非线性有限元法来模拟板料冲压成形过程，而用模拟退火法进行回弹预测的创新思路。同时为提高传统模拟退火法的计算效率及求得全局最优解的精度，还提出将速度较快、局部寻优能力较强、编程简单且适于解决设计变量数目 $N=100$ 的大规模优化问题的变尺度法与模拟退火法相结合的BFGS-SA算法，建立针对具体回弹问题的退火控制策略。通过实例仿

真计算结果与试验结果的分析，证明了将模拟退火法用于覆盖件的回弹预测是一种新的、有效的尝试，在所使用有限元模型合理的情况下，BFGS-SA算法的求解精度是比较令人满意的。但作为一种将有限元计算与优化设计相结合的回弹预测方法，该方法在用于大型、复杂覆盖件的回弹预测时，其计算效率有待于进一步提高。

参 考 文 献

- [1] XUE P, YU T X, EDMUND C. Theoretical prediction of the springback of metal sheets after a double-curvature forming operation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89-90(0): 65-71.
- [2] FINN M J, GALBRAITH P C, WU L, et al. Use of a coupled explicit-implicit solver for calculating spring-back in automotive body panels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 50(1-4): 395-409.
- [3] ASNAFI N. On springback of double-curved autobody panels[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(1): 5-37.
- [4] LARS G, ERIK S. Improving the properties of exterior body panels in automobiles using variable blank holder force[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 114(2): 168-173.
- [5] 康立山, 谢云, 尤矢勇. 非数值并行算法(第一册: 模拟退火算法)[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [6] 刘惟信. 机械最优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [7] 杨若黎, 顾基发. 一种高效的模拟退火全局优化算法[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 5: 29-35.
- [8] DEKKERS A, AARTS E. Global optimization and simulated annealing[J]. Mathematical Programming 1991, 50(3): 367-393.

SPRINGBACK PREDICTION OF COVER PANELS BASED ON SIMULATED ANNEALING ALGORITHM

LI Fuzhu¹ GUO Yuqin¹

WANG Xiaochun² SONG Wei³

(1. Technology Institute, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221011;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

3. Department of Mechanical Engineering, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001)

(下转第 228 页)