

基于改进蝴蝶优化算法的覆盖件拉延模压料面设计方法

宋晨欣¹, 彭 威^{1,2}, 彭冰元³, 易 阳⁴, 倪皎云⁴

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;
3. 磐翼信息科技(上海)有限公司, 上海 201100; 4. 无锡易通精密机械股份有限公司, 江苏 无锡 214174)

摘要: 压料面的设计是保证覆盖件高质量成形的重要前提, 提出了一种基于改进蝴蝶优化算法的压料面多曲面设计方法。首先, 根据拉延工艺特征要求, 建立由倒角、直线、曲线按顺序组成的边界组合模板; 然后, 在组合模板的基础上, 提出基于改进蝴蝶优化算法的压料面边界拟合法, 通过引入混沌映射丰富初始种群的多样性和提高全局搜索能力, 同时对个体执行高斯变异策略, 增强局部搜索能力, 提升收敛速度; 最后, 对生成的各边界曲线段进行分组和匹配, 通过扫描和引导生成相应的多曲面压料面。针对汽车覆盖件得到的多曲面压料面既满足了工艺特征组合要求, 又保证了覆盖件的外轮廓形状, 数值仿真与成形试验表明, 该方法设计的压料面能有效满足拉延工艺要求, 保证了覆盖件的成形质量。

关键词: 覆盖件; 压料面; 多曲面设计方法; 蝴蝶优化算法; 模面工程

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.012

中图分类号: TG386.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 05-0096-09

Binder surface design method for panel drawing die based on improved butterfly optimization algorithm

Song Chenxin¹, Peng Wei^{1,2}, Peng Bingyuan³, Yi Yang⁴, Ni Jiaoyun⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
3. Pan-i Information Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201100, China;
4. Yitong Corporation, Wuxi 214174, China)

Abstract: The binder surface design is an important prerequisite to ensure the high-quality of panel forming. Therefore, a multi-curvature design method for binder surface based on an improved butterfly optimization algorithm was proposed. Firstly, according to the requirements of drawing process characteristics, the boundary combination template composed of chamfer, straight line and curve in order was established. Then, based on the combination template, a binder surface boundary fitting method based on the improved butterfly optimization algorithm was proposed, and by introducing chaotic mapping to enrich the diversity of initial population and improve the global search ability. At the same time, Gaussian variation strategy was implemented for individuals to enhance the local search ability and improve the convergence speed. Finally, the generated boundary curve segments were grouped and matched, and the corresponding multi-curvature binder surfaces were generated through scanning and guiding. For automotive panel, the multi-curvature binder surface obtained not only meets the requirements of process feature combination, but also ensures the outer contour shape of panel. Numerical simulation and forming tests show that the binder surface designed by this method meets the drawing process requirements and guarantees the forming quality of panel.

Key words: panel; binder surface; multi-surface design method; butterfly optimization algorithm; die surface engineering

汽车覆盖件是汽车中重要的组成部分之一, 它的成形质量直接影响着汽车的后续生产, 同时也是

汽车个性化和升级换代的重要保证。随着数值模拟技术^[1]的不断发展, 汽车覆盖件在制造前需要进行成形质量的仿真验证, 以确保实际生产的汽车覆盖件的成形质量, 提升生产效率。

在覆盖件的成形模拟过程中, 覆盖件的模面工程直接影响了仿真的准确性, 是板料成形仿真领域的一项关键技术, 受到了许多专家学者的关注。瑞士的 Schenk O 等^[2]针对传统系统在模具型面设计中

收稿日期: 2024-10-08; 修订日期: 2025-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11402264)

作者简介: 宋晨欣 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 648422098@qq.com

通信作者: 彭 威 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: weipengme@jiangnan.edu.cn

设计效率低的问题,开发出一种基于进化策略的进化式型面自动设计(Evolutionary Automatic Design, EAD)系统,以金属板料的成形性为目标函数,优化模具型面的各个参数,以实现模具型面的快速设计。兰质纯^[3]根据覆盖件拉延成形的不同特点对模具型面设计进行研究,提出了凸型面、类筋板结构型面以及类筋板凸型面的拉延成形方法,并加以验证。王远峰等^[4]对模具型面进行了分析研究,针对飞机零部件模具设计过程中遇到的曲面延拓困难的问题,采用B样条双向蒙皮造型技术对曲面进行了重构。

压料面是模面设计中的重要组成部分,同时压料面在覆盖件拉延成形中具有重要作用,合理的压料面设计能够有效防止拉延缺陷的产生。王玉国等^[5]对基于事例的覆盖件成形CAD系统进行了研究,提出了设计思想和设计流程,讨论了基于变量化技术的压料面和工艺补充面设计方法,建立了覆盖件拉延模压料面和工艺补充面的截面特征库。王义林等^[6]从工艺角度出发对覆盖件压料面的设计过程进行分析,实现了拉延模板的参数化,开发了采用参数化、标准化、模板化设计思想的覆盖件模具结构设计系统。段彦宾等^[7]对当前压料面引起的成形缺陷进行了系统分析,提出了相应的改进措施和有效的思路方法,降低了制件发生缺陷的概率,显著降低了模具开发的成本与周期。

目前,在压料面的生成方法中,进行传统的经验设计^[8]时,设计者根据零件的不同,通过典型的截面线来实现,其自动化程度和工艺性能不高。传统压料面自动生成系统在工艺性方面的考虑较少,而人为设计压料面形状又难以实现自动化。基于此,本文综合考虑冲压模具压料面成形中满足工艺要求和压料面成形自动化这两个目标,构建一个运用边界组合模板生成零件边界组合曲线的模型,设计了一种基于改进的蝴蝶优化算法的方法来求解模型中的边界组合曲线的数学模型。

1 压料面多曲面设计方法

实施压料面工艺化设计的基础是要求压料面的形状满足工艺设计的要求,实现拉延过程中板料均匀流动且避免拉延缺陷的产生。平面、圆柱面、圆锥面等直纹面^[9]在不同的载荷下依旧可以保持高效的结构性^[10],能够满足板料均匀流动变形^[11]的特点,对其进行合适的曲面连接后,可以被用于压

料面的工艺化设计。为此,提出了多曲面压料面设计方法,该方法的设计步骤如图1所示。

在多曲面压料面设计方法中,通过边界线构造多曲面压料面的步骤如下。

(1) 建立曲线拟合优化模型:建立由倒角、直线等工艺几何特征按特定顺序组成的边界组合模板,针对组合模板确定目标函数。

(2) 优化算法求解与拟合:运用优化算法进行优化,确定模板曲线的参数,对边界曲线进行拟合。

(3) 曲线段匹配生成曲面:连接对应曲线段并适当延长,形成多曲面压料面。

2 基于改进蝴蝶优化算法的工艺特征曲线拟合

2.1 工艺特征曲线拟合优化模型

为确保符合冲压工艺要求,边界线采用如图2所示的由直线、圆弧、样条曲线等几何特征线段按顺序组成的参数曲线组合模型。为此,需要根据输入的产品边界线,确定参数曲线组合模型的合理参数,使得参数曲线组合模型和给定的边界点距离误差最小。图2中,点 p_0 与点 p_5 为拟合曲线的起始点与终止点,参数 l_1 和 θ_1 确定了一段直线段形态,参数 l_2 和 θ_2 确定了另一条直线段形态,参数 h 确定了中间段样条曲线始末点, R_1 与 R_2 分别为两圆弧段曲线的半径。

给定边界曲线第 i 个原始点 $S_i^* = (x_i^*, y_i^*)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 其中 n 为原始点的总数量。原始点对应的组合曲线拟合点为 $T_i = (x_i, y_i)$ 。如图2所示,点 p_1 的横纵坐标值与相关参数关系如下:

$$\begin{cases} x_{p_1} = x_{p_0} + l_1 \sin \theta_1 \\ y_{p_1} = y_{p_0} + l_1 \cos \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:点 p_1 的坐标为 (x_{p_1}, y_{p_1}) ;点 p_0 的坐标为 (x_{p_0}, y_{p_0}) ; l_1 和 θ_1 为对应直线段的长度和与竖直方向的角度(点 p_4 的相关参数关系与此类似)。

圆弧段 p_1p_2 圆心的横坐标值 j 与相关参数关系如式(2)所示:

$$j = \frac{(y_{p_1} - k)y_{\tau}}{x_{\tau}} + x_{p_1} \quad (2)$$

式中: k 为圆心纵坐标值; $T(x_{\tau}, y_{\tau})$ 为 p_1 点处的直线单位切向量。

圆弧段 p_1p_2 圆心的纵坐标值与已知参数的关系如式(3)所示:

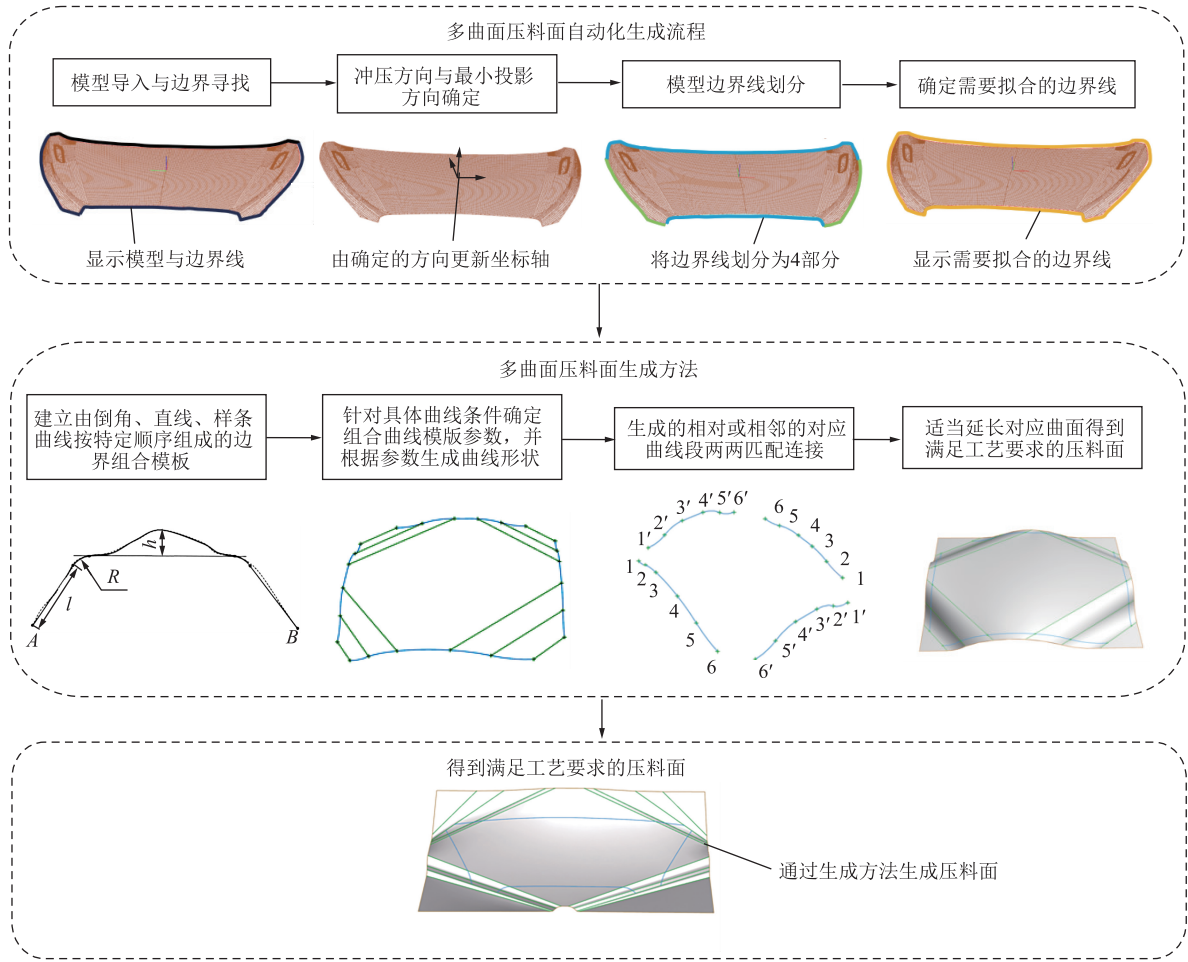


图 1 多曲面压料面设计方法

Fig. 1 Design method of multi-curvature binder surface

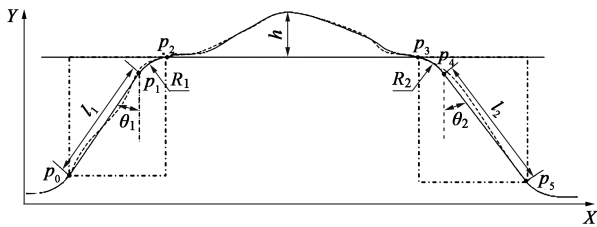


图 2 工艺特征曲线模型

Fig. 2 Model of process characteristic curve

$$k = \frac{2(x_{p_1} - x_{p_2}) \left(\frac{y_{p_1}}{x_{p_1}} y_{p_2} + x_{p_1} \right) + x_{p_2}^2 + y_{p_2}^2 - x_{p_1}^2 - y_{p_1}^2}{2 \left[\frac{y_{p_1}}{x_{p_1}} (x_{p_1} - x_{p_2}) - (y_{p_1} - y_{p_2}) \right]} \quad (3)$$

圆弧段 p_3p_4 的确定方法与此类似。确定 3 次 B 样条曲线 $nurbCurve(x_i^*)$ 。以各原始曲线点对应拟合点的距离之和最小为优化目标，对于曲线左半段，根据曲线段的不同，用分段函数形式（式（4））表示原始点与拟合点之间的距离 Dis ，组合曲线右半

段计算方法类似：

$$Dis = \begin{cases} \text{abs}[mx_i^* + \alpha - y_i^*], & x_i^* \in (x_{p_0}^*, x_{p_1}^*) \\ \text{abs}[\sqrt{R^2 - (x_i^* - j)^2} - y_i^*], & x_i^* \in (x_{p_1}^*, x_{p_2}^*) \\ \text{abs}[nurbCurve(x_i^*) - y_i^*], & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\text{abs}[\]$ 为绝对值函数，即取括号内数值的非负值； m 和 α 为对应直线段的斜率与截距； R 为对应圆弧段半径； $x_{p_0}^*$ 为对应的拟合直线段起始点 p_0 的横坐标； $x_{p_1}^*$ 为对应的拟合直线段的终止点 p_1 的横坐标； $x_{p_2}^*$ 为对应的拟合圆弧段终止点 p_2 的横坐标。

原始曲线的所有点对应其拟合点的拟合误差 S 可以用式（5）表示：

$$S = \sum_{i=1}^n Dis(x_i^*) \quad (5)$$

因此，可以构建工艺特征曲线的优化函数：

$$f(h, l_1, \theta_1, l_2, \theta_2) = \text{Min}(S) \quad (6)$$

式中： $Min(S)$ 为原始曲线所有点对应其拟合点的拟合误差 S 的最小值。

为求解式 (6) 所示的工艺特征曲线优化函数，提出了一种改进的蝴蝶优化算法来获取合理的组合曲线参数。

2.2 基于改进蝴蝶优化算法的工艺特征曲线求解

由 Arora S 等^[12]于 2019 年提出的蝴蝶优化算法 (Butterfly Optimization Algorithm, BOA) 是基于蝴蝶觅食策略产生的元启发式算法，蝴蝶朝着食物或配偶移动时进行全局搜索，受到自然等因素影响进行随机移动时进行局部搜索，BOA 的实现过程主要分为以下 6 个步骤。

步骤 1：在初始化阶段，算法定义目标函数及其解空间，设置最大迭代次数 T ，随机生成 N 只蝴蝶的位置 x'_L ($L=1, 2, 3, \dots, N, t=1, 2, 3, \dots, T$)，确定搜索范围和包括感觉模态 c 和依赖于感觉模态的幂指数 a (表示对香味不同程度的吸收) 在内的所有初始参数，定义切换概率 p 的值。

步骤 2：使用公式计算每只蝴蝶的香味系数。记录香味浓度最大的最佳蝴蝶位置。

步骤 3：在 $[0, 1]$ 范围内随机生成随机数 r 。对比 r 与 p ，如果 $r < p$ ，进行全局搜索更新每只蝴蝶的下一个位置；如果 $r \geq p$ ，进行局部搜索更新每只蝴蝶的下一个位置。

步骤 4：更新感觉模态 c 的值。

步骤 5：计算每个适应度值并比较所有适应度值。如果有更好的蝴蝶，记录并替换最佳的蝴蝶和最佳适应度值。

步骤 6：计算迭代次数 $t=t+1$ 。判断 t 是否等于 T ，如果 $t \neq T$ ，则返回步骤 2，继续执行，否则，停止迭代循环。

蝴蝶优化算法在求解工艺特征曲线拟合模型时容易陷入局部最优且收敛速度慢，本文对蝴蝶优化算法进行改进，提出了混沌高斯变异蝴蝶优化算法 (Circle Chaotic Mapping Gaussian Variation Butterfly Optimization Algorithm, CGBOA)。改进后的算法引入了混沌映射增加初始种群的多样性，有利于全局位置的搜索；在蝴蝶的移动过程中引入非线性递减惯性权重，以平衡全局搜索与局部搜索；引入高斯变异在当前变异的蝴蝶个体附近生成更大的扰动，使得算法易于跳出局部最优值。

运用改进算法进行工艺特征曲线拟合的具体实现步骤为：初始化解向量，将向量维度设定为 5，分别对应拟合问题中的 h 、 l_1 、 θ_1 、 l_2 和 θ_2 这 5 个参

数；设置种群数量、迭代次数 T 以及香味计算公式中的 a 、 c 和切换概率 p 等参数，随机生成蝴蝶位置，每个蝴蝶的位置对应着一组初始解。其中，初始解生成的 l_1 、 θ_1 、 l_2 、 θ_2 应保证点 p_1 和 p_4 位于各自的范围框之内，生成解向量后，对解向量进行混沌映射处理。Circle 混沌映射^[13-14]的定义如式 (7) 所示：

$$x_{k+1} = x_k + b - (P - 2\pi) \sin(2\pi x_k) \bmod(1) \quad (7)$$

式中： x_k 为进行映射处理前的值； x_{k+1} 为进行映射处理后的值； $\bmod(1)$ 为对 1 的求余函数，使结果落在 $[0, 1)$ 内； P 为控制参数，通常取 $P=0.5$ ； b 为平移参数，通常取 $b=0.2$ 。

式 (7) 将生成 $(0, 1)$ 之间的混沌数，将 Circle 混沌映射引入后，每只蝴蝶的初始位置由选定的混沌映射确定，直至达到种群规模。然后计算每只蝴蝶的香味系数，香味 f_L 是刺激强度 I 的函数，如式 (8) 所示：

$$f_L = cI^a \quad (8)$$

式中： f_L 为第 L 只蝴蝶对香味的感知强度。

通过式 (4) 和式 (5) 得到每个解向量所对应的拟合误差，记录当前最优解。全局搜索与局部搜索由取值为 0 到 1 之间的随机数 r 与切换概率 p 的大小决定。在改进算法中，将全局位置更新公式变更为式 (9)：

$$x_L^{t+1} = \omega x_L^t + (r^2 g^* - x_L^t) f_L \quad (9)$$

式中： x_L^t 为迭代次数为 t 的第 L 只蝴蝶的解向量； g^* 为在当前阶段的所有解中找到的当前最佳解； ω 为惯性权重^[15]。

权重计算公式如式 (10) 所示：

$$\omega(t) = 1.6 - 0.8 \frac{1}{1 + 30 \times 0.9^{\frac{100t}{T}}} \quad (10)$$

全局位置更新后，为了在搜索范围内进一步寻优，引入高斯变异策略^[15]，利用高斯变异在当前变异的蝴蝶个体附近生成更大的扰动，以使算法更容易跳出局部最优值。标准高斯分布函数如式 (11) 所示：

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (11)$$

式中： x 为取值范围为 $(-\infty, +\infty)$ 的随机数。

求得当前最优解后对当前全局最优解进行变异处理。一般情况下，高斯变异的规则如式 (12) 所示：

$$GP_i(t) = P_i(t) [1 + \text{Gaussian}(\rho)] \quad (12)$$

式中： $P_i(t)$ 为第 i 只蝴蝶在迭代 t 次时所处的位置； $GP_i(t)$ 为第 i 只蝴蝶在迭代 t 次时经过高斯变异后所处的位置； $\text{Gaussian}(\rho)$ 为满足均值为 0 且

标准差为 1 的标准高斯分布的随机变量。

如果 $r > p$, 算法进入局部搜索, 局部搜索阶段可以表示为式 (13):

$$x_L^{t+1} = x_L^t + (r^2 x_v^t - x_u^t) f_L \quad (13)$$

式中: x_u^t 和 x_v^t 是从解空间中随机选择的 u 和 v 蝴蝶, 且 x_u^t 和 x_v^t 属于同一子群。

在进行全局搜索或者局部搜索后, 改进算法将进行自适应度感知模态的更新, 在香味函数中, 感觉模态 c 的取值范围为 $(0, \infty)$ 。为了平衡全局迭代与局部迭代过程, 将感觉模态修改为式 (14):

$$c_{t+1} = c_t + \frac{0.05}{c_t \cdot T} \quad (14)$$

式中: c_t 和 c_{t+1} 分别为迭代至 t 和 $t+1$ 时的感觉模态。

记录更新后的每个解向量的值, 即 h 、 l_1 、 θ_1 、 l_2 和 θ_2 这 5 个解的值, 以及全局状态下拟合曲线与原始曲线最小拟合误差所对应的最优解, 判断其是否在合理的边界范围之内, 如果越界, 将解向量对应的越界解拉回至边界位置。利用更新后的感觉模态重新计算香味系数并重新进入循环, 若达到最大迭代次数, 则结束循环, 输出最优的 h 、 l_1 、 θ_1 、 l_2 和 θ_2 值和其对应的拟合误差的值。改进的蝴蝶优化算法的整体流程如图 3 所示。

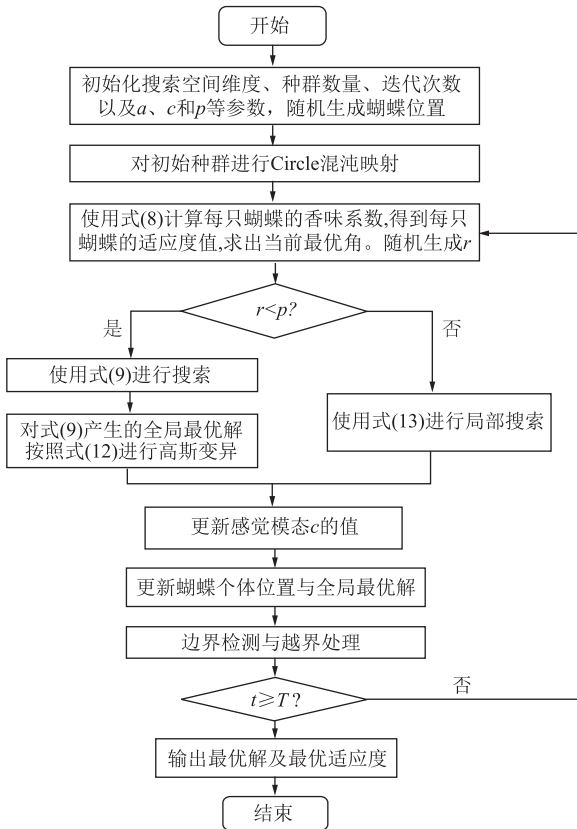


图 3 CGBOA 流程图

Fig. 3 Flow chart of CGBOA

2.3 特征曲线拟合

为了验证本文算法在工艺特征曲线拟合方面的有效性, 进行了一系列的仿真, 硬件环境统一配置为 12th Gen Intel (R) Core (TM) i9-12900H 2.50 GHz 内存 16.0 GB 的计算机。设定所有算法的初始种群规模为 30, 迭代次数为 100 次。为了更好地平衡局部搜索与全局搜索, 将切换概率 p 均设为 0.8, 初始感觉模态 c 设为 0.01, 幂指数 a 设为 0.1, 对汽车盖板模型的 4 条边界进行组合曲线拟合。

图 4a 为汽车盖板模型的原始边界曲线 1 和采用 BOA 和 CGBOA 方法拟合得到的边界线, 采用 BOA 与 CGBOA 方法进行优化后的工艺特征曲线的拟合误差如图 4b 所示, 其中, 拟合误差为边界曲线上所有的原始点的纵坐标与对应拟合点的纵坐标差值的绝对值之和。由图 4b 可知, 采用 CGBOA 方法优化后的工艺特征曲线的最终平均拟合误差为 129 mm, 而 BOA 方法优化后的工艺特征曲线的拟合误差达到 205 mm, CGBOA 方法相对于 BOA 方法拟合误差减小了 37.07%, 同时 CGBOA 方法的寻优效率明显优于 BOA 方法。

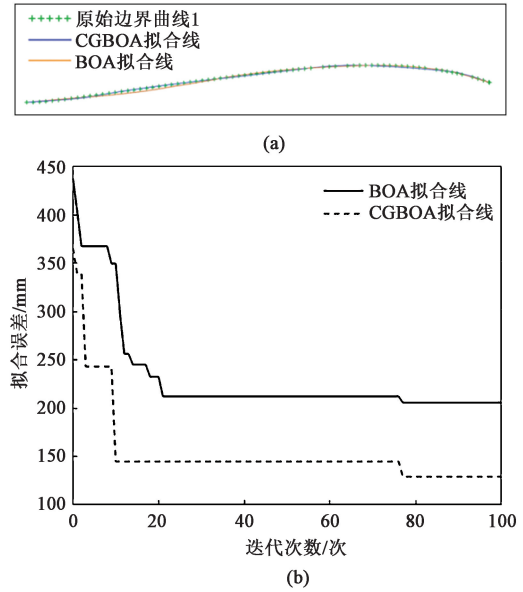


图 4 边界曲线 1 (a) 及其对应的优化迭代曲线 (b)

Fig. 4 Boundary curve 1 (a) and corresponding optimization iteration curves (b)

图 5 展示了汽车盖板模型边界曲线 2 的拟合结果及拟合误差。由于边界曲线 2 相比边界曲线 1 的形状具有对称分布的特点, 由图 5b 可知, 改进后的蝴蝶优化算法前期收敛速度较原始蝴蝶优化算法更快, 先于 BOA 方法达到其较为稳定的拟合误差 150 mm, 当迭代至 20 次左右时跳出局部最优, 并

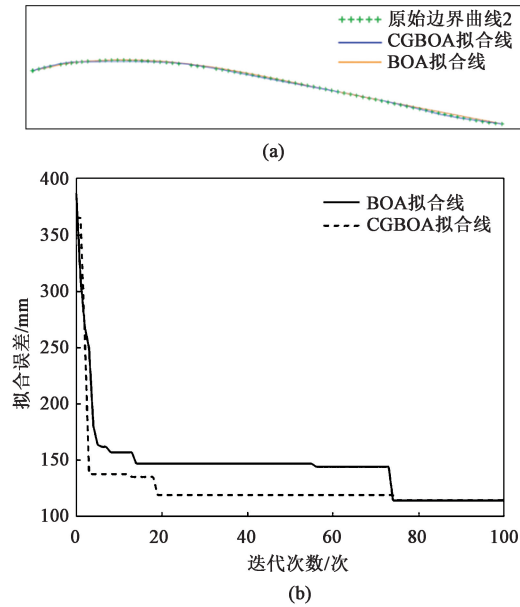


图 5 边界曲线 2 (a) 及其对应的优化迭代曲线 (b)
Fig. 5 Boundary curve 2 (a) and corresponding optimization iteration curves (b)

进一步减小拟合误差。

图 6a 展示了汽车盖板模型的边界曲线 3 的拟合结果，图 6b 为边界曲线 3 的迭代次数和误差比较结果。由图 6b 可知，改进后的蝴蝶优化算法更快达到最优解，在处理工艺特征曲线拟合方面表现优异。

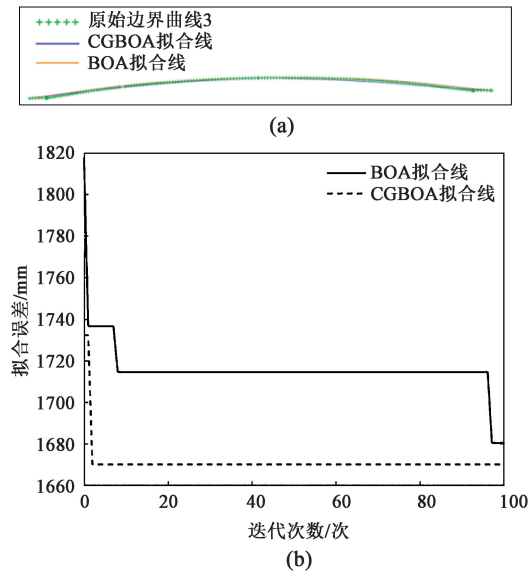


图 6 边界曲线 3 (a) 及其对应的优化迭代曲线 (b)
Fig. 6 Boundary curve 3 (a) and corresponding optimization iteration curves (b)

图 7 为汽车盖板模型的拟合曲线 4 及其迭代过程对比。由图 7b 所示，本文提出的改进 CGBOA 方

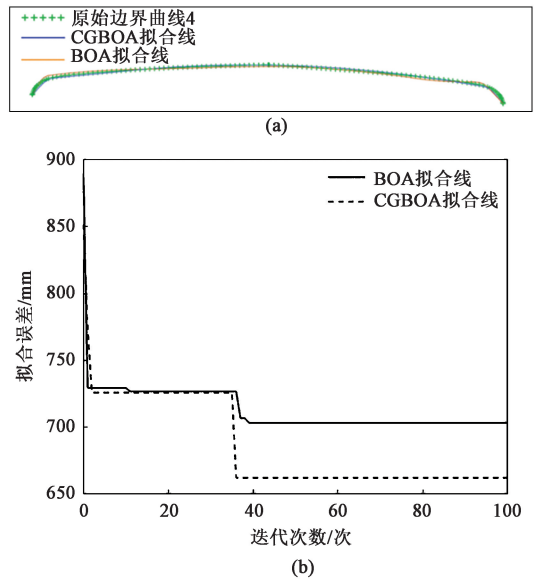


图 7 边界曲线 4 (a) 及其对应的优化迭代曲线 (b)
Fig. 7 Boundary curve 4 (a) and corresponding optimization iteration curves (b)

法具有更快的收敛速度和更低的拟合误差。

拟合后的工艺特征曲线（图 4~图 7）对应的组合曲线参数如表 1 所示。实验结果表明，改进后的蝴蝶优化算法可获得合理的组合曲线参数，满足面向工艺特征的边界曲线拟合要求。

表 1 不同工艺特征曲线的参数

Table 1 Parameters of different process feature curves						
边界曲线	l_1/mm	$\theta_1/(\text{^\circ})$	l_2/mm	$\theta_2/(\text{^\circ})$	R_1/mm	R_2/mm
1	62.1	81.5	28.2	45.6	$R168.0$	$R101$
2	28.0	45.0	63.8	82.0	$R103.0$	$R117$
3	143.0	82.2	142.0	76.4	$R540.0$	$R601$
4	31.3	44.9	31.4	45.1	$R97.1$	$R107$

3 实验结果及验证

运用 CGBOA 算法对汽车盖板模型的 4 条边界进行工艺特征曲线拟合，拟合后的 4 条工艺特征曲线如图 8 所示。根据多曲面压料面生成方法，依次连接相邻边界线对应曲线段并延长至合适平面，得到如图 9 所示的直线引导线。以连接的直线作为构建曲面的引导线生成相应的曲面，最终形成如图 10a 所示的多曲面压料面，而图 10b 为主流冲压软件生成的单曲面压料面结果。

分别对生成的多曲面压料面以及主流软件自动生成的单曲面压料面进行冲压仿真模拟。首先，分

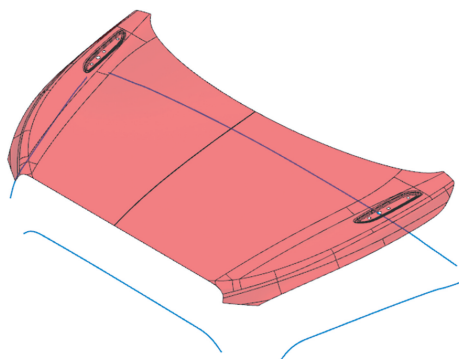


图 8 拟合后的工艺特征曲线

Fig. 8 Process feature curves after fitting

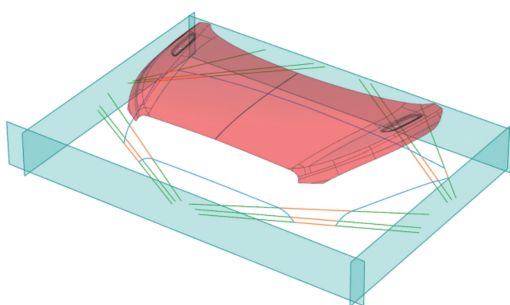
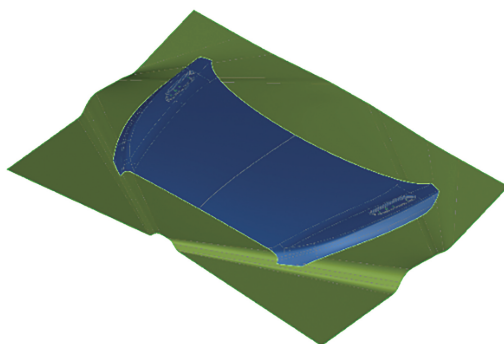
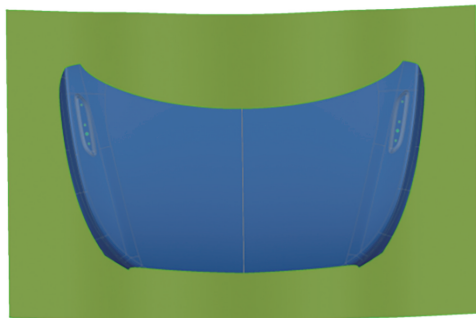


图 9 工艺特征曲线匹配及连接

Fig. 9 Matching and connection of process feature curves



(a)

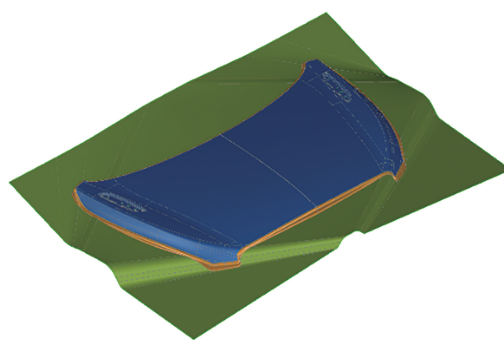


(b)

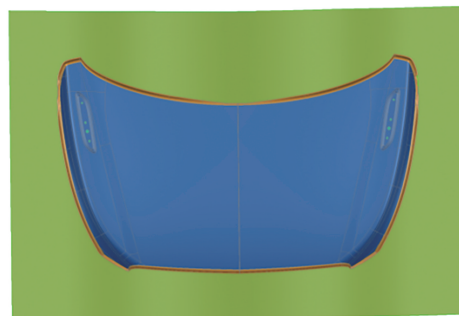
图 10 多曲面压料面 (a) 与单曲面压料面 (b)

Fig. 10 Multi-curvature binder surface (a) and single-curvature binder surface (b)

别对其进行相同形式的工艺补充面构建, 得到如图 11 所示的结果。之后进行冲压仿真得到如图 12 所示的成形分析结果。从成形仿真结果可知: 采用本文方法所设计的压料面时, 板料在冲压仿真中没有出现明显的起皱及破裂现象; 而采用主流软件自动生成的压料面时, 板料在冲压仿真过程中前、后部分的两侧位置出现了明显的破裂现象。因此, 按照本文多曲面压料面设计方法得到的压料面相较于主流冲压软件自动生成的单曲面压料面更能满足覆盖件的成形分析需求。



(a)



(b)

图 11 工艺补充面构建

(a) 多曲面压料面 (b) 单曲面压料面

Fig. 11 Construction of process addendum surfaces

(a) Multi-curvature binder surface (b) Single-curvature binder surface

形状复杂的前围板零件在成形过程中材料起皱与开裂之间的窗口较窄, 压料面构形对压边圈的形状和模具的成功开发具有重要影响。图 13a 为运用本文多曲面压料面设计方法得到的汽车前围板零件的压料面, 采用该压料面得到的前围板成形结果如图 13b 所示。图 14 为车身覆盖件多曲面压料面及成形结果实例, 其中, 图 14a 为运用多曲面压料面设计方法得到的蝶形压料面, 采用该压料面得到的成形结果见图 14b。图 13 和图 14 的结果表明, 采用多曲面压料面设计方法生成的压料面在面对不同复杂零件时能够满足实际拉伸工艺的要求。

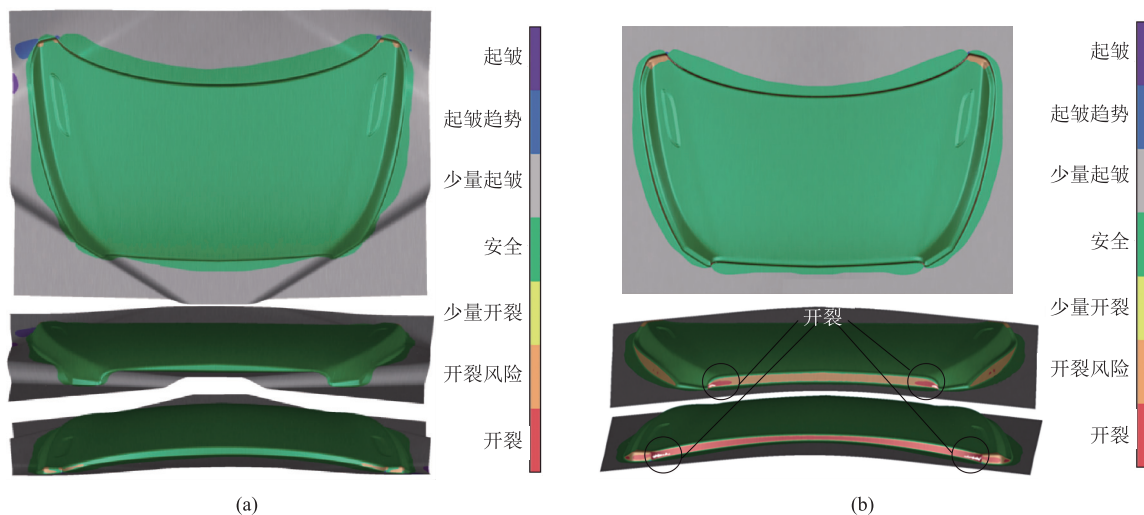


图12 成形仿真结果

(a) 多曲面压料面 (b) 单曲面压料面

Fig. 12 Results of forming simulation

(a) Multi-curvature binder surface (b) Single-curvature binder surface

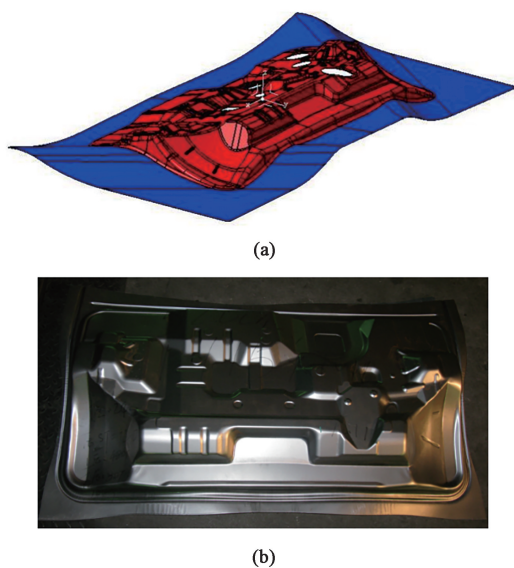


图13 汽车前围板多曲面压料面 (a) 及其成形结果 (b)

Fig. 13 Multi-curvature binder surface (a) and its forming result (b) for automobile front cowl panel

4 结论

(1) 对汽车覆盖件冲压成形工艺进行分析, 针对拉延成形中材料流动性导致的起皱、断裂等缺陷问题, 总结了冲压工艺型面设计中对压料面的设计要求, 提出一种满足冲压工艺要求的多曲面压料面设计方法。

(2) 构建了由倒角、直线、曲线按顺序组成的边界曲线组合模板, 在组合模板基础上, 推导并构

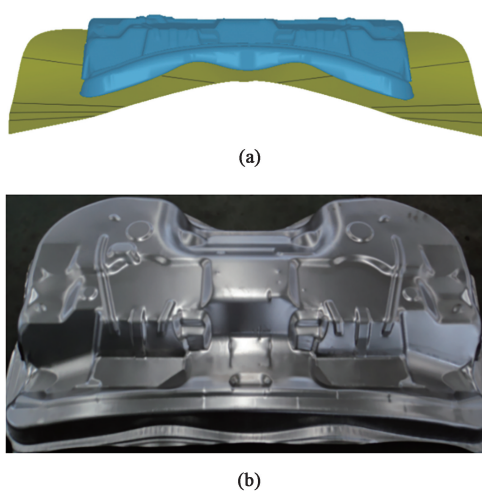


图14 汽车前围板零件蝶形多曲面压料面 (a) 及其成形结果 (b)

Fig. 14 Butterfly-type multi-curvature binder surface (a) and its forming result (b) for automobile front cowl panel

建了工艺特征曲线的优化函数, 通过引入混沌映射及非线性递减惯性权重对经典的蝴蝶优化算法进行改进, 以求解边界曲线组合的参数, 通过车身覆盖件模型的边界曲线拟合验证了改进后的算法对于工艺特征曲线拟合的有效性。

(3) 采用生成的多曲面压料面进行汽车覆盖件冲压工艺设计及仿真验证, 证明了采用多曲面压料面方法生成的压料面能够有效降低冲压件的成形起皱与开裂风险, 为汽车覆盖件压料面设计提供了新的思路。

(下转第252页)