

# 全型面回弹补偿技术研究及应用

郭 涛

(上汽大众汽车有限公司 冲压工艺开发部门, 上海 201805)

**摘要:** 为改善局部回弹补偿法的不足提出了一种解决方案。针对翼子板下部轮廓偏移问题分析了零件的回弹规律, 认为局部回弹补偿法存在局限性的根本原因是其无法对型面从拱变平坦的回弹趋势进行整体准确补偿。提出了采用全型面回弹补偿的方法, 基于其逆向求解原理分析得到了实现该方法的关键点, 包括确保工艺本身回弹尽量小、保证求解稳健性、剔除约束噪声以及保证外覆盖件表面质量与截面线长的一致性。给出了该方法的实现步骤并应用于某翼子板, 首个全工序零件的尺寸测量结果显示, A 面的偏差在 0.3 mm 内, 轮廓偏移在 0.2 mm 内, 表明采用本方法可得到满足尺寸公差要求的零件。

**关键词:** 回弹补偿; 局部补偿; 全型面补偿; 翼子板; 约束噪声

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.011

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 04-0082-08

## Study and application on full surface springback compensation technology

Guo Tao

(Stamping Process Development, SAIC Volkswagen, Shanghai 201805, China)

**Abstract:** A solution was proposed to improve the shortcomings of the local springback compensation method, and for the offset problem of the lower profile for fender, the springback law of part was analyzed, and the fundamental reason for the limitations of the local springback compensation method was that the springback trend of surfaces from arch to flat could not be compensated integrally and accurately. Then, the method of full surface springback compensation was proposed, and the key points for implementing this method was obtained based on the analysis of its reverse solution principle, including minimizing the springback of the process, ensuring the robustness of the solution, eliminating the constraint noise and ensuring the consistency of surface quality and cross-section line length for outer panel. Furthermore, the implementation steps of this method was provided and applied to a certain fender. The dimensional measurement results of the first full-process part show that the deviation of A-surface is within 0.3 mm, and the profile offset is within 0.2 mm, indicating that the parts that meet the dimensional tolerance requirements can be obtained using this method.

**Key words:** springback compensation; local compensation; full surface compensation; fender; constraint noise

汽车造型的多样性导致冲压覆盖件回弹尺寸控制的难度越来越大, 基于数值模拟仿真进行回弹补偿是解决该问题的主要手段<sup>[1]</sup>。常用方法为局部补偿法, 即型面部分区域固定, 仅对局部区域进行回弹补偿。虽然该方法易于制作补偿型面数据, 但需对补偿区域及量值试错调整, 补偿效果存在随机性<sup>[2-3]</sup>。特别是对于复杂外覆盖件, 此方法往往难以满足装车阶段对零件型面及轮廓尺寸的高要求, 需消耗较多的资源进行模具调试与尺寸优化<sup>[4]</sup>。

近年来, 另一种区别于局部回弹补偿法的方法

被逐步重视, 即对零件整个区域进行回弹补偿的全型面回弹补偿法。该方法最初在纵梁、车门窗框、机罩内板等内板件上取得了较好的应用效果<sup>[5-6]</sup>, 然后逐步应用到门外板等简单外覆盖件及翼子板、侧围等复杂外覆盖件上<sup>[7-9]</sup>。已有研究大多是针对技术的应用验证, 并未对机理展开深入讨论<sup>[5-9]</sup>。例如, 缺乏对局部回弹补偿法存在不足的根本原因的分析, 进而无法说明全型面回弹补偿法具备优势的原因; 未从理论上说明全型面回弹补偿法的原理, 进而无法得到影响该方法应用效果的关键因素。针对现有研究的盲区, 本研究将首先分析局部回弹补偿法存在局限性的原因, 从而更好地解释为何全型面回弹补偿法具有优势。进一步给出全型面回弹补偿法的原理, 并基于此得出实现该方法的关键控制点, 最后基于理论分析开展应用验证。

收稿日期: 2024-01-02; 修订日期: 2024-03-29

作者简介: 郭 涛 (1988-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: guotao1988@163.com

## 1 局部回弹补偿法的局限性

### 1.1 局部回弹补偿法的问题

翼子板是典型的复杂外覆盖件,冲压工序复杂且匹配零件多,导致其尺寸控制难度较大<sup>[10-13]</sup>。以翼子板为对象,说明局部回弹补偿法的局限性及其原因。

某翼子板采用局部回弹补偿法进行回弹补偿后在下部牛腿区域存在典型的间隙度问题。图1a为零件在检具上的状态,下部轮廓后移,导致检具横销无法插入。图1b的尺寸测量结果(向车外变形为正值)显示,牛腿从上至下的偏移量逐渐增加至1.13 mm。

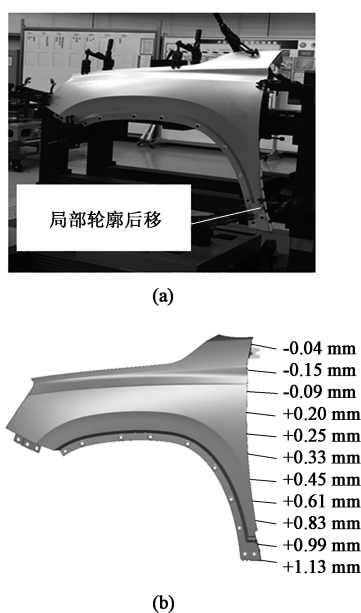


图1 某翼子板的典型尺寸问题

(a) 零件在检具上的状态 (b) 零件轮廓尺寸报告

Fig. 1 Typical size problems of a fender

(a) Part status on measuring tool (b) Size report of part profile

图2为局部回弹模拟结果,牛腿轮廓向后偏移1.2 mm,在牛腿无夹持条件下型面翘起13 mm。该结果说明零件轮廓后移与型面上翘同时存在。

### 1.2 局部回弹补偿法的局限性

#### 1.2.1 零件回弹规律分析

覆盖件一般均设计为外凸型面,在拉延及翻边工序会产生趋于平坦的回弹变形<sup>[14]</sup>。图3为翼子板回弹前后的截面示意图,回弹后零件在自由状态下呈两侧变高、中间变低的状态,定义两侧高度变化量为 $h_1$ ,中间高度变化量为 $h_2$ ,采用 $h_1+h_2$ 衡量变

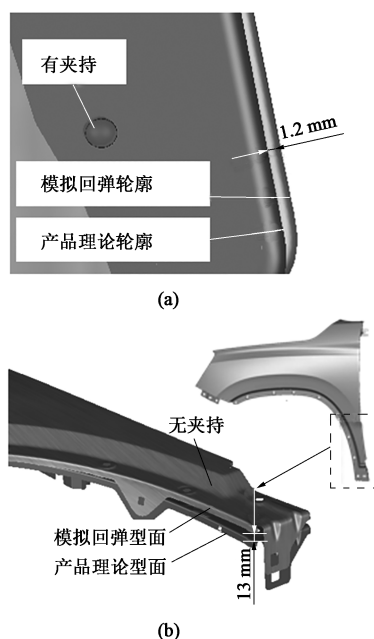


图2 局部回弹模拟结果

(a) 轮廓偏移 (b) 型面上翘

Fig. 2 Simulation results of local springback

(a) Profile offset (b) Surface warping

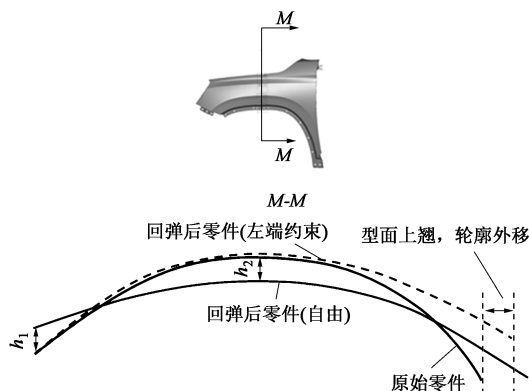


图3 回弹前后翼子板的截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fender cross-section before and after springback

after springback

平坦程度,数值越大代表变化程度越高。同时,基于零件截面线长一致原则,将变平坦的零件一端约束,另一端会出现轮廓外移现象。

#### 1.2.2 零件牛腿区域间隙度问题原因

按照1.2.1节中衡量零件回弹变平坦程度的方式,基于回弹模拟,在宽度区间 $L$ 内对比3个不同截面的法向回弹量,如图4所示。从近车头区域截面A到近门区域截面C,变平坦程度从2.5 mm减小至0.7 mm,其影响因素主要为零件的翻边特征分布,靠近门区域变平坦程度低,是由于该处翻边特征刚性大,对尺寸有较强的固型作用。在1.2.1节

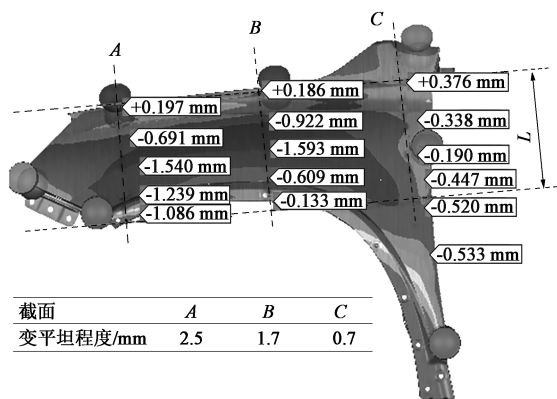


图 4 基于回弹模拟的翼子板不同截面变平坦程度对比

Fig. 4 Comparison of flattening degree on different cross-sections for fender based on springback simulation

中提到,回弹后约束状态下会出现轮廓外移现象,将零件在检具上夹持约束时,轮廓外移区域会向约束小的地方变化,牛腿是检具上的最后夹紧约束点,因此,在测量报告中显示该处轮廓向后偏移,出现间隙度问题。

### 1.2.3 局部回弹补偿法存在局限性的原因

上述分析可知,造成牛腿间隙度问题的根本原因在于零件回弹后型面会变平坦,且不同区域变平坦的程度是不同的。局部回弹补偿法存在局限性的根本原因也在于此:无法对零件回弹后型面变平坦的趋势进行整体补偿,仅能对补偿区域范围及量值进行尝试性的选择与调整。图 5 为前述问题零件的补偿策略,被广泛应用于外覆盖件补偿,往往经过多轮次尝试后依然无法实现对型面的整体有效补偿,最终导致零件尺寸问题的产生。

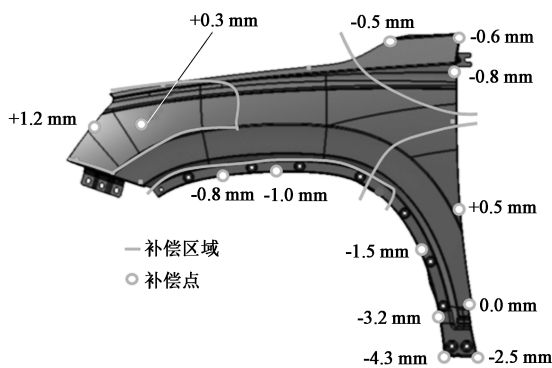


图 5 翼子板局部回弹补偿方案

Fig. 5 Local springback compensation scheme of fender

## 2 全型面回弹补偿的关键点及实现方法

为解决上述问题,有必要对零件回弹后型面变

平坦的趋势进行整体修正。采用基于逆向求解的全型面回弹补偿法是一个解决思路,下面介绍如何找出逆向求解的关键点及其具体实现方法。

### 2.1 逆向求解原理及关键点

图 6 为回弹补偿逆向求解基本原理。将“冲压成形与回弹变形”整个过程作为函数  $f$ ,在稳定工艺下,输入  $P$  型面产品,可输出回弹后的  $K$  型面工序件。回弹补偿逆向求解的本质是在函数  $f$  下希望得到输出  $P$ ,求满足条件的输入  $P_k$ 。考虑尺寸公差  $\varepsilon$ ,将预期输出定义为  $(P-\varepsilon, P+\varepsilon)$ ,只要找到一种逆向求解的实现方法求得  $P_k$ ,使  $f(P_k) \in (P-\varepsilon, P+\varepsilon)$ ,即可解决回弹补偿问题。

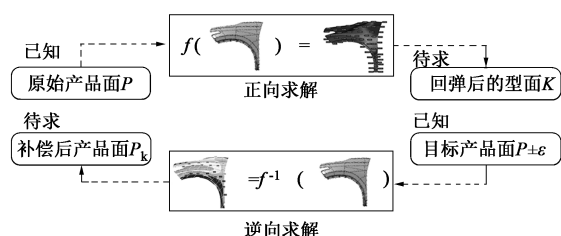


图 6 回弹补偿逆向求解基本原理

Fig. 6 Basic principle of reverse solution for springback compensation

函数  $f$  为材料成形过程中应力、应变平衡分布后的几何关系映射,并非显示公式,需借助有限元分析软件对各工序成形计算后叠加为  $f$ 。对该函数  $f$  逆向求解,同样需要借助有限元分析软件。利用 AutoForm 软件基于正向求解的回弹向量场节点位移进行逆向求解,如图 7 所示,取零件的部分截面说明回弹补偿求解原理。线长为  $L_0$  的原始产品,经冲压可得到线长为  $L_s$  的回弹后产品。基于回弹前后的网格节点可得到从原始产品指向回弹后产品的回弹向量。如图 7a 所示,首次逆向求解得到向量 1 及对应的网格节点,进而可得到线长为  $L_{c1}$  的首次补偿产品,显然  $L_0 = L_s \neq L_{c1}$ 。基于零件回弹前后截面线长应保持不变的原则,需对补偿后的网格节点距离再平衡,如图 7b 所示,进行二次逆向求解得到向量 2 及对应的网格节点,进一步得到线长为  $L_{c2}$  的二次补偿产品,满足  $L_0 = L_s = L_{c2}$ 。进而基于补偿后的各节点可得到回弹补偿后的整个产品面。

实现逆向求解的关键点包括两方面:

(1) 严格控制正向求解函数  $f$  的各影响因素以保证其准确性:首先,  $f$  应满足输出尽可能小,即基础工艺回弹量尽量小;其次,保证  $f$  的稳健性,输入的小波动不引起输出的明显波动,即冲压回弹的稳健性;最后,剔除函数  $f$  的噪声,如避免在大

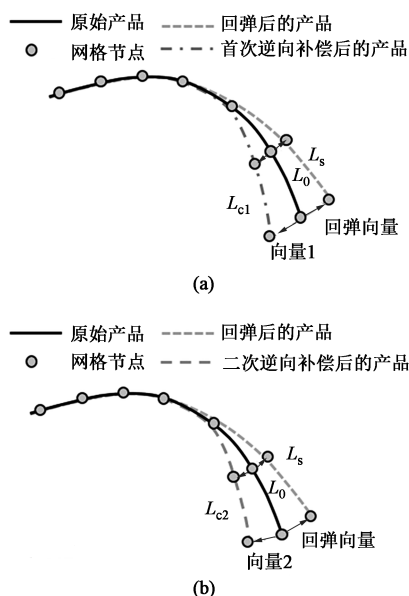


图7 AutoForm 补偿求解原理

(a) 首次逆向补偿 (b) 二次逆向补偿

Fig. 7 Solution principles of AutoForm compensation

(a) The first reverse solution (b) The second reverse solution

夹持力及大内应力下计算回弹导致回弹结果失真, 具体而言, 约束力不可大于 3 N。

(2) 针对外覆盖件表面质量及轮廓匹配要求高的特点, 仅满足  $f(P_k) \in (P-\varepsilon, P+\varepsilon)$  还不够。需对  $P_k$  进一步优化, 得到满足表面质量合格性及各处截面线长一致性要求的  $P_{k-opt}$ , 使  $f(P_{k-opt}) \in (P-\varepsilon, P+\varepsilon)$ 。

## 2.2 全型面回弹补偿实现方法

基于上述关键点分析, 以 AutoForm 仿真软件为例, 给出全型面回弹补偿实现方法, 如图 8 所示。步骤 1~步骤 4 为正向求解过程, 需保证求解的回弹尽可能小、稳健性及约束噪声最小化, 步骤 5~步骤 8 为逆向求解过程, 需要保证补偿策略合理, 基于网格节点向量场进行补偿型面重构, 保证型面质量

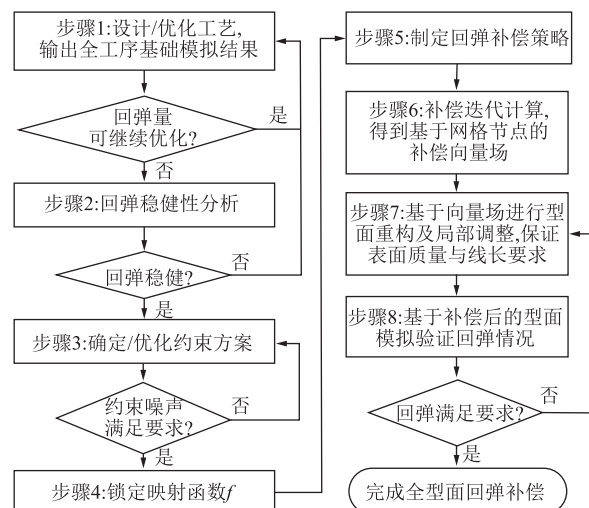


图8 全型面回弹补偿实现方法

Fig. 8 Realization method of full surface springback compensation

及线长。

## 3 技术应用

以某车型翼子板为例说明全型面回弹补偿的应用效果, 该零件材料为 CR2-GI40/40 的深冲钢, 厚度为 0.6 mm, 经过拉延、修冲、整形等共 5 道工序完成。

### 3.1 回弹补偿方案

按照 2.1 节中所述关键点进行正向求解, 求解软件选用 AutoForm R8, 回弹计算考虑重力影响。

首先为关键点 1, 控制正向求解函数  $f$  的各影响因素。对图 9 所示的约束噪声作进一步说明, 图 9a 为实际检具约束, 其中,  $R_{xy}$  代表  $X$  与  $Y$  向约束, 其余含义同理, 整圆处的约束与检具相同, 半圆处的约束与检具不同,  $Y$  向为垂直屏幕向外的方向,  $Y$  向最大约束力为 45 N,  $X$  向最大约束力为 13 N, 最

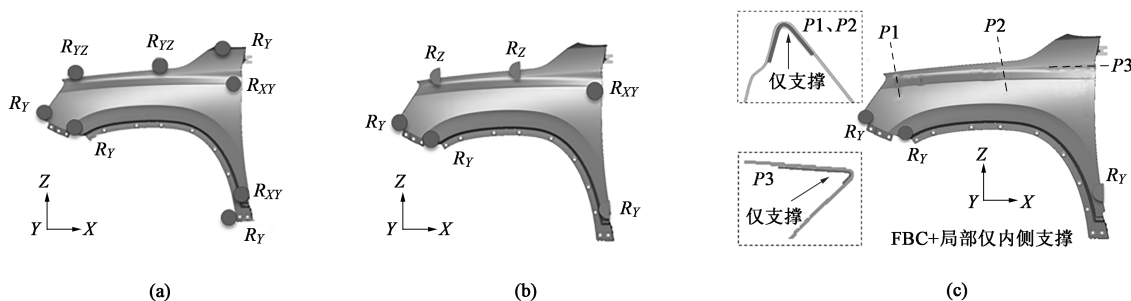


图9 约束噪声控制方法

(a) 实际检具约束 (b) 正向求解约束 (c) 补偿后模拟验证约束

Fig. 9 Constraint noise control method

(a) Constraint of real tool (b) Constraint for forward solution (c) Constraint for simulation verification after compensation



噪声过大。正向求解采用图 9b 所示的固定边界 (Fix Boundary Condition, FBC) 约束,  $Y$  向最大约束力仅为 0.6 N,  $X$  向最大约束力为 0.2 N, 满足噪声要求, 基于此进行回弹正向求解及补偿逆向求解。补偿后的结果在约束噪声较小的条件下验证, 如图 9c 所示,  $Y$  向最大约束力仅为 2.2 N,  $X$  向最大约

束为 0.4 N, 相比实际检具的全约束状态更能真实地反映零件的补偿效果。

其次为关键点 2, 基于上述逆向求解得到回弹补偿数据后, 基于表面质量及线长进行局部型面优化与重构, 各位置截面线长在补偿前后的差值控制在 0.2 mm 内, 如图 10 所示。

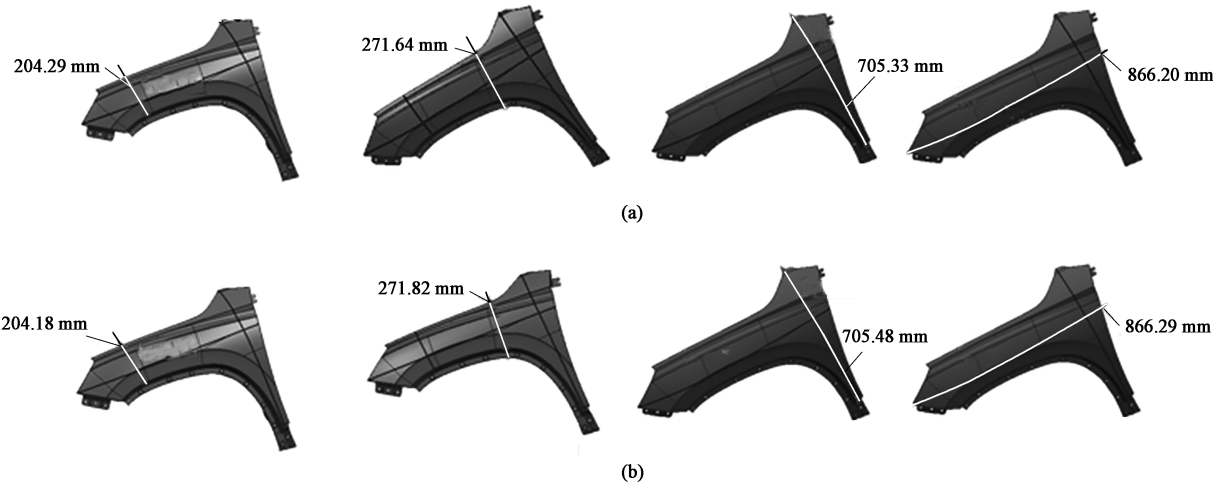


图 10 补偿前后各位置的截面线长  
(a) 补偿前 (b) 补偿后

Fig. 10 Length of cross-section line in each position before and after compensation  
(a) Before compensation (b) After compensation

最终, 得到 2.1 节中所述 Ak-opt 回弹补偿数据, 型面回弹补偿量如图 11 所示, 除最后一工序

外, 其余各工序型面补偿量相同, 最大向车内补偿量约为 6.00 mm。

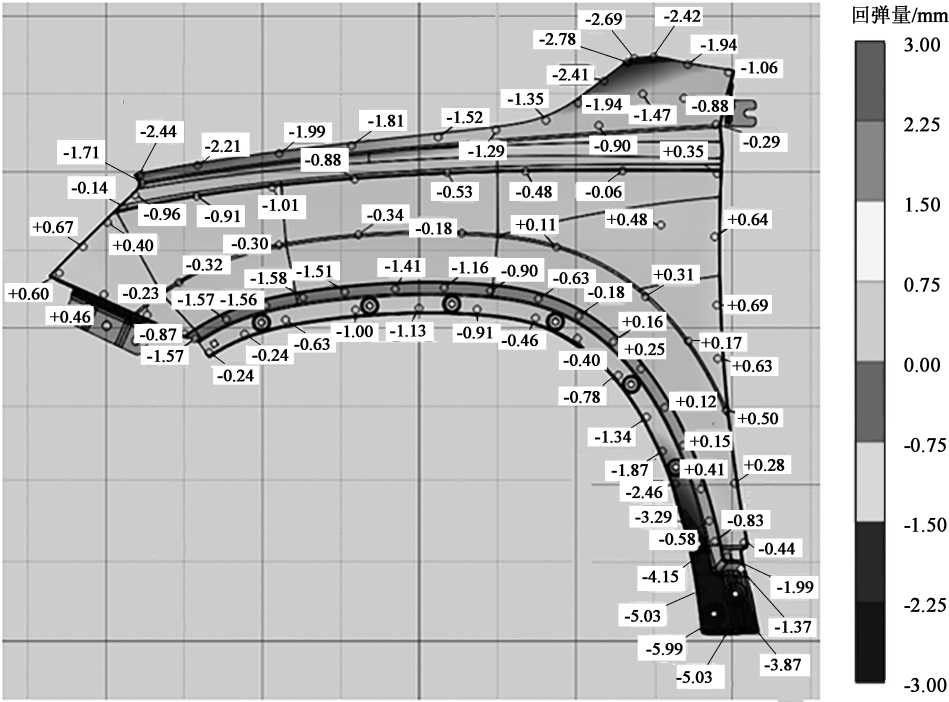


图 11 型面回弹补偿量

Fig. 11 Springback compensation amounts of surface

3.2 回弹补偿模拟结果

图 12 为补偿前后的型面回弹模拟情况，补偿前后的约束条件分别见图 9b 与图 9c，两种约束下最大力均在 3 N 内，满足小约束条件，均能较好地反映零件本身的尺寸状态。从表 1 中的模拟结果来看，

补偿后相比补偿前，A 面的最大回弹量从 2.7 mm 降至 0.3 mm，拉延结构面（即下部牛腿区域）的最大回弹量从 5.8 mm 降至 0.7 mm，轮廓最大偏移量从 0.8 mm 降至 0.2 mm，全型面回弹补偿达到了较好的模拟结果。

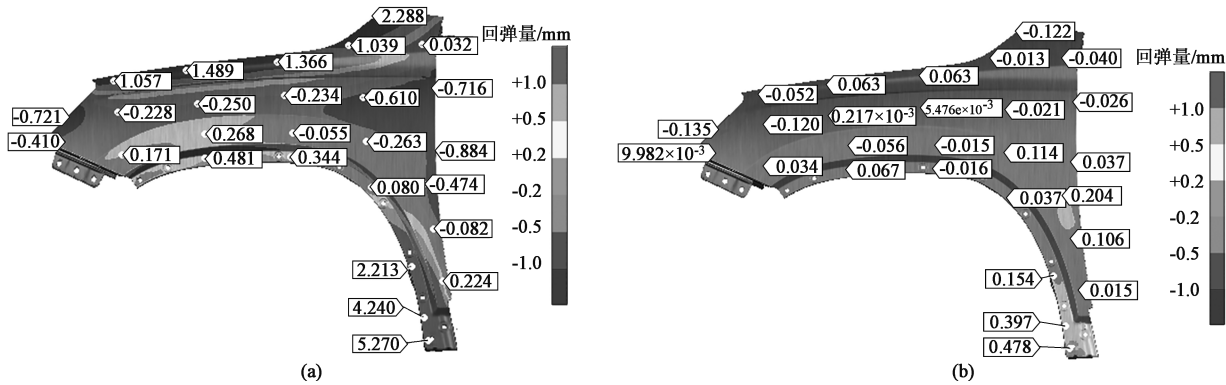


图 12 补偿前 (a) 与补偿后 (b) 的型面回弹模拟情况  
Fig. 12 Simulation results for surface springback before (a) and after (b) compensation

表 1 补偿前后的回弹模拟结果对比 (mm)  
Table 1 Comparison for springback simulation results before and after compensation (mm)

模拟阶段	A 面	结构面（非翻边）	轮廓偏移
补偿前	-0.8~+2.7	-1.2~+5.8	-0.8~+0.8
补偿后	-0.2~+0.3	-0.5~+0.7	-0.2~+0.2

3.3 实际零件补偿效果

进一步，从 A 面尺寸及轮廓尺寸两个维度，对回弹补偿后的模拟值与调试阶段首个全工序零件的测量值进行比对。其中，模拟计算的约束条件与实际检具约束相同，即图 9a 所示的约束状态。

图 13 为 A 面尺寸的模拟值与实测值对比，二者的偏差在 0.3 mm 以内，图 13 中将零件 A 面边缘区

域型面的回弹量值进行了特别标注，该值会影响翼子板与周围零件的型面匹配高度差。绝大多数厂家对该区域的尺寸公差要求为±0.5 mm，特别高的会控制到±0.3 mm<sup>[15]</sup>。从实际测量结果可见，尺寸完全满足公差要求。

图 14 为轮廓尺寸的模拟值与实测值对比，正值表示轮廓变大，向零件外回弹，二者的偏差基本在 0.2 mm 内。轮廓的回弹值会影响翼子板与周围零件的缝隙宽度。绝大多数厂家对该区域尺寸的公差要求为±0.5 mm，特别高的会控制到±0.3 mm。从实际测量结果可见，尺寸完全满足公差要求，特别是在下部牛腿区域，完全未出现 1.1 节中应用局部回弹补偿法后出现的轮廓向后偏移问题。

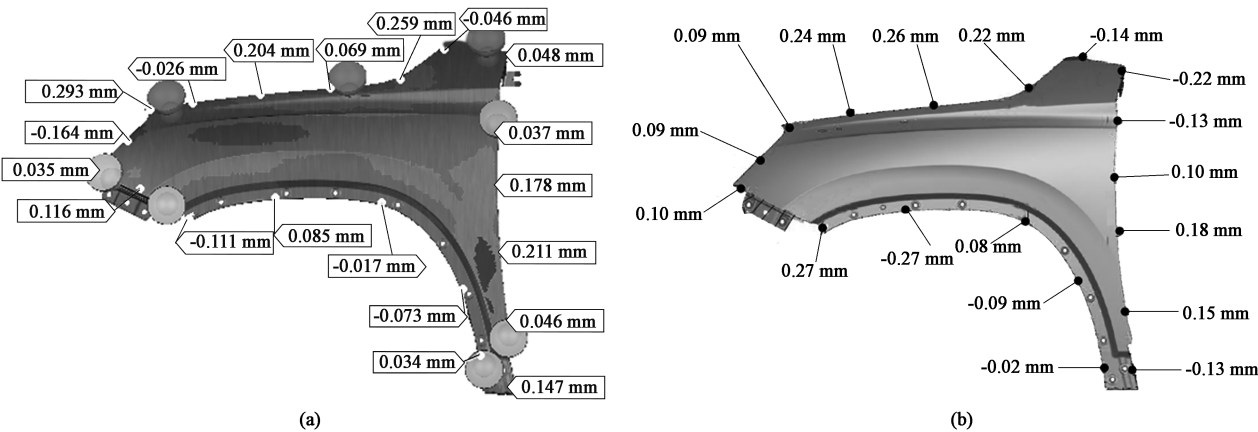


图 13 A 面回弹量的模拟值 (a) 与实际零件测量值 (b) 对比  
Fig. 13 Comparison between simulated values (a) and measured values of actual part (b) for A-surface springback amounts

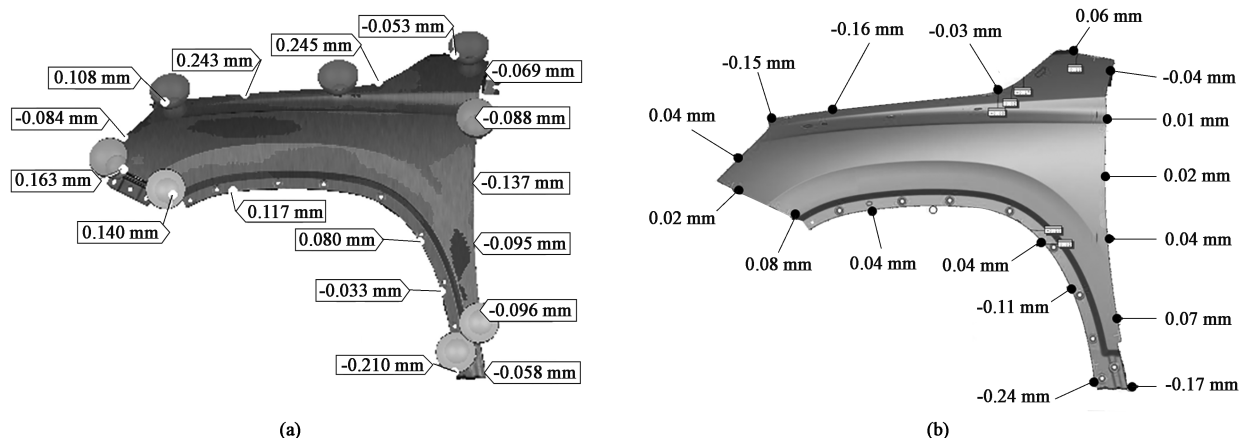


图 14 轮廓回弹量的模拟值 (a) 与实际零件测量值 (b) 对比

Fig. 14 Comparison between simulation values (a) and measured values of actual part (b) for profile springback amounts

## 4 结论

(1) 以翼子板为案例, 说明了局部回弹补偿法对外覆盖件进行回弹补偿时存在局限性, 根本原因在于该方法无法实现对型面变平坦的趋势进行整体全面的补偿, 进而无法有效地解决轮廓偏移问题。

(2) 全型面回弹补偿法能够对型面整体进行补偿因而可有效克服局部回弹补偿法的局限性。基于对全型面回弹补偿逆向求解原理的分析, 提出了求解的关键点: (1) 严格控制正向求解函数  $f$  的各影响因素, 包括基础回弹量控制、稳健性保证以及约束噪声控制; (2) 针对外覆盖件, 需保证表面质量及截面线长的一致性。基于此给出了完整的实现流程方法。

(3) 通过全型面回弹补偿法在某车型翼子板上的实际应用验证了该方法的有效性。通过对求解关键点的严格把控, 得到了满足要求的回弹补偿模拟结果。对实际零件 A 面及轮廓回弹量的测量结果显示, 采用本方法得到的零件尺寸可完全满足公差要求。

### 参考文献:

- [1] Zhang Z K, Wu J J, Zhang S, et al. A new iterative method for springback control based on theory analysis and displacement adjustment [J]. International Journal of Mechanical Science, 2015, 105: 330-339.
- [2] 薛颖, 陈青山, 黄瑶, 等. 汽车铝合金天窗加强板冲压回弹控制 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 84-90.  
Xue Y, Chen Q S, Huang Y, et al. Control on stamping springback for aluminium alloy automobile skylight reinforcing sheet

- [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 84-90.
- [3] 赵子海, 孟宇轩, 江克洪, 等. 铝后门外板回弹补偿措施研究 [J]. 模具工业, 2020, 46 (11): 37-40.  
Zhao Z H, Meng Y X, Jiang K H, et al. Research on springback compensation of aluminum rear door outer panel [J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (11): 37-40.
- [4] 魏春谊, 刘继发, 孙胜伟, 等. 数字化设备在新车型侧围尺寸回弹优化中的应用 [J]. 锻造与冲压, 2022, (18): 24-29.  
Wei C Y, Liu J F, Sun S W, et al. The application of digital devices in optimizing the rebound size of new car models [J]. Forging & Metalforming, 2022, (18): 24-29.
- [5] 刘文杰, 雷声. 汽车纵梁成形回弹及补偿 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (3): 127-132.  
Liu W J, Lei S. Forming springback and compensation of auto girder [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11 (3): 127-132.
- [6] 张恒, 江庆顺, 张玉成. 某车型高强板纵梁回弹问题及整改措施 [J]. 模具工业, 2020, 25 (1): 35-40.  
Zhang H, Jiang Q S, Zhang Y C. The rebound problem and rectification measures of the high-strength plate longitudinal beam of a certain vehicle model [J]. Die & Mould Industry, 2020, 25 (1): 35-40.
- [7] 崔礼春, 高双明, 黄顶社, 等. 基于数值模拟的后门外板全型面回弹补偿技术研究 [J]. 锻造与冲压, 2021, (14): 59-63.  
Cui L C, Gao S M, Huang D S, et al. Research on the full surface rebound compensation technology of the rear door outer panel based on numerical simulation [J]. Forging & Metalforming, 2021, (14): 59-63.
- [8] 夏灿添, 刘志强, 黄义关, 等. 汽车覆盖件翼子板全型面回弹补偿方法应用研究 [J]. 模具制造, 2021, 21 (11): 18-21.  
Xia C T, Liu Z Q, Huang Y G, et al. Research on the springback compensation method of the fender panel [J]. Mould Manufacturing, 2021, 21 (11): 18-21.

- [9] 王双枝, 高双明, 杨谊丽. 一种侧围外板回弹补偿方法研究及应用 [J]. 锻造与冲压, 2023, (16): 47-49.  
Wang S Z, Gao S M, Yang Y L. A compensation method for rebound of side panel outer panel Research and application [J]. Forging & Metalforming, 2023, (16): 47-49.
- [10] 宋光密, 张秀利, 于旭明. 翼子板轮毂部位扭曲控制措施 [J]. 模具工业, 2020, 46 (3): 41-45.  
Song G M, Zhang X L, Yu X M. Control measures for twisting of the fender hub area [J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (3): 41-45.
- [11] 邱振海. 浅谈翼子板尖角尺寸的控制方法 [J]. 锻造与冲压, 2023, (12): 57-60.  
Qiu Z H. Research on size control method of fender sharp corner [J]. Forging & Metalforming, 2023, (12): 57-60.
- [12] 崔爱豹, 刘畅, 郭晓东, 等. 乘用车翼子板冲压回弹补偿方法研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2023, (1): 40-44.  
Cui A B, Liu C, Guo X D, et al. Research on fender springback compensation for passenger car [J]. Automobile Technology & Material, 2023, (1): 40-44.
- [13] 蒋磊, 张雄飞, 龚熙, 等. 汽车翼子板成形仿真与回弹补偿研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2022, (11): 8-17.  
Jiang L, Zhang X F, Gong X, et al. Research on forming simulation and springback compensation of automobile fenders [J]. Automobile Technology & Material, 2022, (11): 8-17.
- [14] 陈科, 王冀军. 汽车覆盖件弧线翻边回弹原理及控制方法 [J]. 模具工业, 2019, 45 (1): 37-41.  
Chen K, Wang J J. Springback theory and control process of the arc flanging for automotive cover panels [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (1): 37-41.
- [15] 姜珍, 史有为, 吴迪, 等. 基于尺寸工程的车身前端外观质量分析 [J]. 汽车工艺与材料, 2020, (12): 21-24.  
Jiang Z, Shi Y W, Wu D, et al. Analysis of front end appearance quality of vehicle based on dimensional engineering [J]. Automobile Technology & Material, 2020, (12): 21-24.

+++++  
(上接第61页)

- [8] 董德威, 颜云辉, 张尧, 等. 矩形件优化排样的自适应遗传模拟退火算法 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 (18): 2499-2504.  
Dong D W, Yan Y H, Zhang Y, et al. Adaptive genetic simulated annealing algorithm in optimal layout of rectangular parts [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24 (18): 2499-2504.
- [9] 高勃, 张红艳, 朱明皓. 面向智能制造的不规则零件排样优化算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (6): 1673-1680.  
Gao B, Zhang H Y, Zhu M H. Optimization algorithm of irregular parts layout for intelligent manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27 (6): 1673-1680.
- [10] Rao Y Q, Wang P, Luo Q. Hybridizing beam search with tabu search for the irregular packing problem [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, (2021): 1-14.
- [11] 杜冰, 郭晓强, 方杰, 等. 二维不规则图形排样问题的一种混合求解算法 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 39-45.  
Du B, Guo X Q, Fang J, et al. A hybrid solving algorithm on two-dimensional irregular graphics nesting problem [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 39-45.
- [12] 闫嘉, 李林峰, 林毓培, 等. 基于改进免疫遗传算法的汽车零件排样 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2023, 45 (5): 204-214.  
Yan J, Li L F, Lin Y P, et al. Automobile parts packing based on improved immunogenetics algorithm [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2023, 45 (5): 204-214.
- [13] 饶运清, 彭灯, 杜冰, 等. 超边界约束条件下异形件排样问题的求解算法研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29 (12): 4063-4072.  
Rao Y Q, Peng D, Du B, et al. Research on the algorithm for solving the irregular parts packing problem with beyond boundary constraint [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29 (12): 4063-4072.
- [14] 汤德佑, 周子琳. 基于临界多边形的不规则件启发式排样算法 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (9): 2540-2544.  
Tang D Y, Zhou Z L. No-fit-polygon-based heuristic nesting algorithm for irregular shapes [J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36 (9): 2540-2544.
- [15] ESICUP. EURO Special Interest Group on Cutting and Packing [EB/OL]. <https://www.euro-online.org/websites/esicup>, 2023-04-19.
- [16] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence [M]. Ann Arbor: Control & Artificial Intelligence University of Michigan Press, 1975.
- [17] Glover F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence [J]. Computers & Operations Research, 1986, 13 (5): 533-549.
- [18] 周子琳. 基于临界多边形的不规则件排样算法研究及实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
Zhou Z L. Research and Implementation of No-fit-polygon-based Irregular Nesting Algorithm [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [19] 王静静, 瞿少成, 李科林. 一种基于并行交叉遗传算法的二维不规则排样问题求解 [J]. 计算机应用与软件, 2020, 37 (7): 188-193.  
Wang J J, Qu S C, Li K L. A tow-dimensional irregular layout problem solving based on parallel cross genetic algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2020, 37 (7): 188-193.