

## 航空变曲率内蒙皮零件精确成形参数优化

李晓军<sup>1</sup>, 门向南<sup>1</sup>, 毕四龙<sup>2</sup>, 谢延敏<sup>3</sup>, 杜凌峰<sup>3</sup>, 邓 涛<sup>1</sup>, 周 雄<sup>1</sup>

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092; 2. 四川成飞集成科技股份有限公司, 四川 成都 610091;  
3. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 为推动复杂曲面航空钣金构件的快速制造, 以航空变曲率内蒙皮零件为研究对象, 基于冲压拉深技术, 通过设计合理的工艺模型并结合有限元分析手段来实现零件的精确成形。以零件减薄率为目标响应值, 以压边力、凹模与板料间的摩擦因数、压边圈与板料间的摩擦因数为优化变量, 设计3因素5水平正交试验, 建立了BP神经网络代理模型, 并通过粒子群优化算法(PSO)求解得到最佳的工艺参数组合: 压边力为607 kN、凹模与板料间的摩擦因数为0.20、压边圈与板料间的摩擦因数为0.13。采用优化后的工艺参数进行成形仿真, 零件的减薄率与成形质量均有所改善, 仿真模型的预测值与实际值的平均绝对百分比误差MAPE为2.49%, 满足优化精度要求。同时, 采用优化后的参数进行工艺试验, 一次即成形出合格零件, 其实际减薄率与仿真模型预测值的相对误差不大于4.8%, 验证了仿真模型的准确性, 也证明了优化方法的有效性。

**关键词:** 变曲率内蒙皮零件; 压边力; 摩擦因数; BP神经网络; 粒子群优化算法; 减薄率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.016

中图分类号: TG386.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940(2022)11-0116-07

## Precision forming and parameter optimization for aircraft inner skin part with variable curvature

Li Xiaojun<sup>1</sup>, Men Xiangnan<sup>1</sup>, Bi Silong<sup>2</sup>, Xie Yanmin<sup>3</sup>, Du Lingfeng<sup>3</sup>, Deng Tao<sup>1</sup>, Zhou Xiong<sup>1</sup>

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China; 2. Sichuan Chengfei Integration Technology Co., Ltd., Chengdu 610091, China; 3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** In order to promote the rapid manufacturing of aircraft sheet metal components with complex curved surfaces, for the aircraft inner skin part with variable curvature, based on the stamping and deep drawing technology, the precise forming of part was realized by designing reasonable process model and combining with the finite element analysis method. Then, taking the thinning rate of part as the target response value and the blank holder force, friction coefficient between die and sheet and friction coefficient between blank holder ring and sheet as the optimization variables, an orthogonal test with three factors and five levels was designed, a BP neural network surrogate model was established. Furthermore, the best process parameters combination were solved by the particle swarm optimization (PSO) as the blank holder force of 607 kN, the friction coefficient between die and sheet of 0.20 and the friction coefficient between blank holder ring and sheet of 0.13. The results show that the thinning rate and forming quality of part are improved by using the optimized process parameters to conduct the forming simulation. The average absolute percentage error MAPE between the predicted value of the simulation model and the actual value is 2.49%, which meets the requirements of optimization accuracy. At the same time, the optimized parameters were used to carry out the process test, and the qualified parts were formed in one time, and the relative error between the actual thinning rate and the predicted value of the simulation model is less than 4.8%, which verifies the accuracy of the simulation model and proves the effectiveness of the optimization method.

**Key words:** inner skin part with variable curvature; blank holder force; friction coefficient; BP neural network; particle swarm optimization; thinning rate

钣金构件在飞机等航空装备中占有相当大的比

重, 具有不可替代的作用。因此, 钣金成形技术在航天航空生产制造中占据着重要地位, 不仅要满足产品结构的功能, 也要保证产品良好的物理性能, 其生产水平的高低直接影响着产品的质量, 支撑着日渐先进的航空装备的发展<sup>[1]</sup>。长期以来, 复杂曲面钣金构件的成形主要依靠落锤工艺或基于落锤工艺的复合工艺, 这种综合性的半机械化成形方法具

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-03-02

基金项目: 四川省省院省校合作项目(2019YFSY0050)

作者简介: 李晓军(1989-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: lxjupup@163.com

通信作者: 谢延敏(1975-), 男, 博士, 副教授

E-mail: xie\_yanmin@swjtu.edu.cn

有容错高的优点，可成形其他工艺方法不能成形或难以成形的零件，在国内各大主机厂得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。随着我国航空事业的快速发展，客户对零件的生产效率、生产质量、成形性能提出了更高的要求，而落锤工艺则存在成形质量差、效率低、模具维护成本高、成形性能差等显著缺点，难以满足现代航空钣金构件制造的需求。同时，该工艺还存在严重的噪音污染及重金属污染，不符合国家及公司绿色制造的发展规划。

复杂曲面钣金构件的成形已经成为制约航空钣金构件数字化制造的一大难点，各大主机厂及科研院所正在积极开展攻关工作并取得了丰硕成果。文献 [3] ~ 文献 [9] 利用充液拉深成形技术成形出了复杂钣金构件，明显改善了零件的成形性能；文献 [10] ~ 文献 [12] 基于冲压成形技术，通过制定合理的工艺方案并结合有限元技术，成功成形出深腔、凸包等特征零件，实现了对落后工艺的替代；王玲等<sup>[13]</sup>通过局部激光热处理技术对易开裂区域进行局部硬化，提高了易开裂区域的抗变形能力，成功成形出某航空口框零件；Guo Y H 等<sup>[14]</sup>研究了 2 系薄板铝合金在高温下的成形性能，建立了一套损伤耦合粘塑性本构模型，并用于预测材料在冲压过程中的延性断裂。

传统的工程优化问题一般采用直接优化方法和间接优化方法。直接优化方法是按照一定的规则设计多组试验参数，并通过试验得到每组参数对应的目标值，最后选出表现最好的一组参数作为最终结果。间接优化方法是结合有限元分析软件和数学优化模型，通过优化模型改变输入参数并多次调用有限元软件计算其目标值，多次循环后得到最佳结果。相比直接优化方法，间接优化方法大大减小了人力和物力的浪费，在一定程度上也提高了优化结果的准确性，但有限元软件计算的时间成本仍然很高，而且优化模型改变参数的规则对结果的影响很大，不利于结果的准确性。随着优化技术的不断发展，采用代理模型替代有限元软件以及采用智能优化算法替代传统优化模型的方法越来越受欢迎。常用的代理模型包括 Kriging 模型、前向反馈（Back Propagation, BP）神经网络模型、响应面（Response Surface Method, RSM）模型和径向基（Radial Basis Function, RBF）神经网络模型等<sup>[15]</sup>。常用的智能优化算法包括粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）、遗传算法（Genetic Algorithm, GA）、蚁群算法（Ant Colony Optimization, ACO）

和差分进化算法（Differential Evolution Algorithm, DE）等。BP 神经网络模型通过模仿人脑神经元的结构，在训练中不断学习进化，具有良好的非线性映射能力，而且不需要精确的数学模型，被广泛用于解决非线性工程问题。PSO 是基于鸟类群体活动的规律，模仿鸟类的觅食行为，具有较强的全局搜索能力，且参数少易于实现，适用于函数优化、模型分类和工程优化等领域。因此，BP 神经网络模型和 PSO 被广泛应用于工程优化中。张华伟等<sup>[16]</sup>建立了适用于拼焊板盒形件拉深成形压边力预测的 BP 神经网络模型，并使用遗传算法对 BP 神经网络进行优化，获取了理想的压边力曲线。Xie Y M 等<sup>[17]</sup>通过受限玻尔兹曼机优化 BP 神经网络权值阈值，提高了 BP 神经网络在不同维度的映射能力，并成功应用于双 C 件的冲压工艺参数优化中，明显提高了冲压产品的质量。

作为支撑飞机外部蒙皮的内部构件，内蒙皮零件需同时满足贴合外蒙皮型面且具有一定强度及刚性的要求，这就使得大部分该类零件具有变曲率及加强结构等复杂特征，在成形过程中易出现破裂等缺陷。本文基于冲压拉深技术，通过建立已经设计的零件模型，借助有限元分析软件 AutoForm 反求零件的板料模型。以某航空变曲率内蒙皮零件作为研究对象，通过有限元分析零件的厚度分布情况，初步获取影响零件成型的主要工艺参数，并针对主要工艺参数设计正交试验，进而结合 BP 神经网络构建的映射模型与粒子群优化算法（PSO）优化得出最佳工艺参数组合，使用最佳工艺参数组合进行仿真试验，并将仿真结果与实际冲压结果进行对比，验证了该方法的有效性与准确性。

## 1 零件基本信息

### 1.1 材料信息

零件原材料为 O 态 2024 铝合金板材（包铝），厚度为 2.0 mm，将试样在热处理炉中快速加热至 495 ℃并保温，结束后立即放入水中淬火，取出后放入冰箱进行固溶状态保持，冷冻温度为 -18 ℃，得到 W 态的 2024 铝合金板材测试试样。通过对试样进行测试并计算，得到 W 态铝合金材料的性能参数，如表 1 所示。

### 1.2 零件结构特征

变曲率内蒙皮零件结构如图 1 所示。零件尺寸为 610 mm×520 mm，高度为 105 mm，顶部为整体下陷

表 1 2024-W 铝合金性能参数

Table 1 Performance parameters of 2024-W aluminum alloy

取样 方向	试样 编号	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	应变强化 指数 $n$	应变硬化 系数 $k$	各向异性 参数 $r$
0°	#1	172.458	391.16	0.5220	876.654	0.78
	#2	178.522		0.5300	882.426	0.83
45°	#1	157.396	363.68	0.5151	775.205	0.81
	#2	166.250		0.5211	743.857	0.84
90°	#1	173.567	378.16	0.5234	798.455	0.87
	#2	168.572		0.5217	806.216	0.85
平均值	—	169.461	377.67	0.5222	813.802	0.83

腔，深度为 10.8 mm，内部圆角半径  $R$  为 4 mm；两侧法兰宽度为 23~55 mm，法兰处内部圆角半径  $R$  为 10 mm；零件整体为变曲率，弯边半径由  $R64$  向  $R90$  过渡，法兰边与弯边夹角由  $108^\circ$  向  $125^\circ$  过渡。

2 有限元分析

2.1 工艺模型构建

在实际生产中，为了提高复杂航空钣金构件的成形质量，需进行工艺面补充，构建工艺模型。经工艺分析，对目标零件做如下补充：下陷区内孔封闭；两侧法兰边延长至 68 mm，等宽，以便于压边

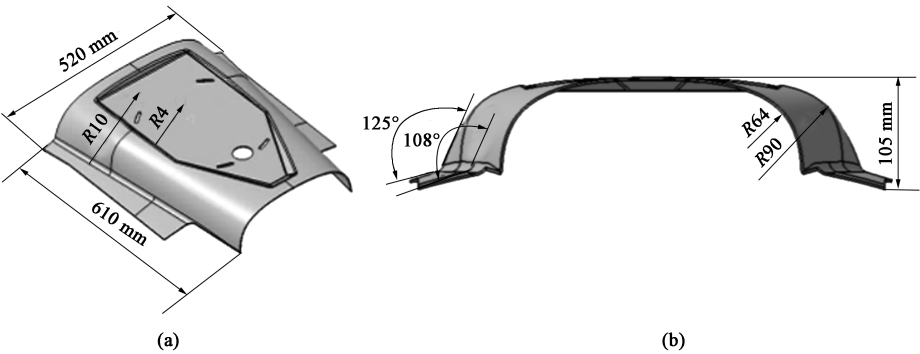


图 1 弯曲率内蒙皮零件结构尺寸图

(a) 俯视图 (b) 侧视图

Fig. 1 Structural dimension diagrams of inner skin part with variable curvature

(a) Vertical view (b) Side view

力控制；两端头设置加强筋，确保零件两端受力充足，以降低起皱风险；两端头各留耳片平面区域，以便于后续数字化切割外形时在铣夹上进行定位。工艺面补充后的工艺模型如图 2 所示。

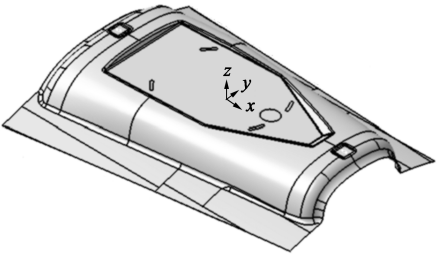


图 2 变曲率内蒙皮零件的工艺模型

Fig. 2 Process model of inner skin part with variable curvature

2.2 毛料展开

基于有限元仿真软件的“一步长”反求算法<sup>[18]</sup>对目标零件进行毛料展开计算，得到较为准确的初始毛料尺寸，再根据实际经验进行修正，得到

最终的毛料展开尺寸，如图 3 所示。

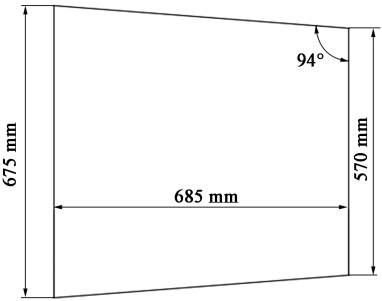


图 3 毛料展开尺寸

Fig. 3 Unfolding sizes of blank

2.3 仿真分析

仿真模型主要包含凹模、凸模、压边圈和板料 4 个部分，其中凹模、凸模、压边圈设置为刚体，板料设置为变形体，成形方式为单动拉深。初始仿真参数为：压边力为 800 kN、凹模与板料间的摩擦因数为 0.16、压边圈与板料间的摩擦因数为 0.16，仿真结果如图 4 所示。

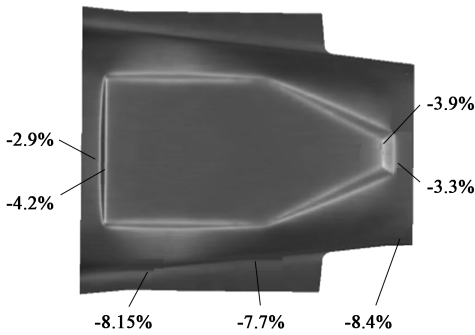


图 4 零件减薄率仿真结果  
Fig. 4 Simulation results for thinning rate of part

3 基于 BP 神经网络的工艺优化

3.1 关键工艺参数确定

冲压拉深工艺参数对冲压成形有着很大的影响，其中压边力、摩擦因数对成形质量的影响极为显著，使得压边力和摩擦因数的控制成为提高零件成形质量的关键。因此，选择板料压边力、凹模与板料间的摩擦因数和压边圈与板料间的摩擦因数作为待优化的工艺参数。图 5 展示了压边力以及各摩擦因数对减薄率的影响。

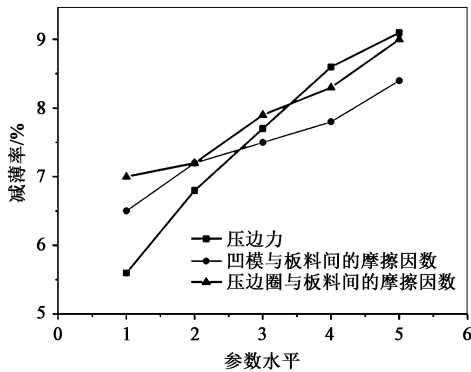


图 5 各参数对零件减薄率的影响曲线  
Fig. 5 Influence curves of various parameters on thinning rate for part

3.2 参数优化过程

3.2.1 正交试验设计

结合查阅文献 [19]~文献 [20] 以及仿真测试，设置各因素、水平如表 2 所示。

对于此处的 3 因素 5 水平正交试验，采用  $L_{25}(5^3)$  正交试验表。因为此处只有 3 个因素，所以，6 因素中的其他 3 个因素的水平用 0 代替，所得正交试验方案如表 3 所示。

表 2 正交试验因素水平表  
Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	压边力 $F/\text{kN}$	凹模与板料间的 摩擦因数 $\mu_1$	压边圈与板料间的 摩擦因数 $\mu_2$
1	600	0.12	0.12
2	700	0.14	0.14
3	800	0.16	0.16
4	900	0.18	0.18
5	1000	0.20	0.20

表 3 正交试验方案  
Table 3 Orthogonal test schemes

序号	压边力 $F/\text{kN}$	凹模与板料间的 摩擦因数 $\mu_1$	压边圈与板料间的 摩擦因数 $\mu_2$
1	600	0.12	0.12
2	600	0.14	0.16
3	600	0.16	0.20
4	600	0.18	0.14
5	600	0.20	0.18
6	700	0.12	0.20
7	700	0.14	0.14
8	700	0.16	0.18
9	700	0.18	0.12
10	700	0.20	0.16
11	800	0.12	0.18
12	800	0.14	0.12
13	800	0.16	0.16
14	800	0.18	0.20
15	800	0.20	0.14
16	900	0.12	0.16
17	900	0.14	0.20
18	900	0.16	0.14
19	900	0.18	0.18
20	900	0.20	0.12
21	1000	0.12	0.14
22	1000	0.14	0.18
23	1000	0.16	0.12
24	1000	0.18	0.16
25	1000	0.20	0.20

通过有限元仿真软件 AotuForm 获得正交试验的仿真结果，并选择图 6 中的 7 个测试点的减薄率作为成形目标的响应值。正交试验的部分响应值如表 4 所示。



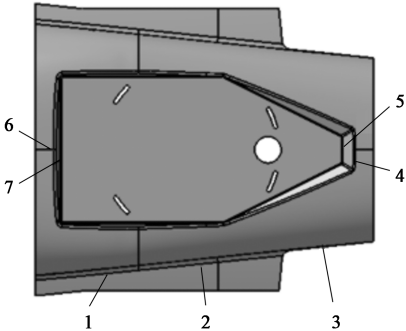


图 6 零件减薄率测试点位置  
Fig. 6 Positions of thinning rate test points for part

表 4 正交试验的部分响应值

Table 4 Partial response values of orthogonal test

试验 序号	测试点						
	1	2	3	4	5	6	7
2	5.7	5.2	6.0	3.5	4.2	3.1	4.4
6	6.7	6.1	7.1	3.8	4.4	3.2	4.3
15	8.1	7.2	8.8	4.3	4.9	3.5	4.9
19	9.0	8.6	9.7	5.4	5.3	3.8	5.5
23	8.1	7.0	8.7	4.2	4.9	3.7	4.8

3.2.2 BP 神经网络的建立和训练

建立多目标的 BP 神经网络映射模型，BP 神经网络的相关参数设定如表 5 所示。

表 5 BP 神经网络参数设定

Table 5 Parameters setting of BP neural network

参数	隐层神经元数量	迭代次数	目标误差	学习率
数值	13	10000	$1 \times 10^{-5}$	0.05

BP 神经网络的训练过程中，从正交试验中选取 20 组样本作为训练样本，其余试验作为测试样本。

BP 神经网络的每一次迭代均会更新权值阈值，通过误差的反向传播来指导 BP 神经网络的学习过程，从而逐渐减小 BP 神经网络的认知误差。经过多次迭代训练，BP 神经网络的训练误差迭代如图 7 所示。满足预测模型的精度要求，使得该模型的预测值有一定的认可度，为后面的多目标优化提供了一个可靠的代理模型。

3.2.3 智能算法寻优

采用粒子群优化算法（PSO）进行工艺优化，PSO 的主要参数设定如表 6 所示，其适应度曲线如图 8 所示。经过 PSO 寻优迭代得到的最佳工艺参数组合如表 7 所示。

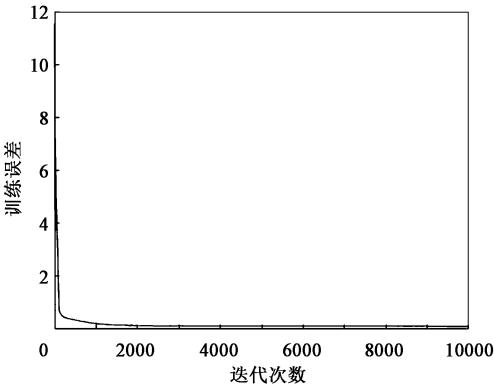


图 7 BP 神经网络训练误差迭代  
Fig. 7 Training error iteration of BP neural network

表 6 PSO 的主要参数设定

Table 6 Main parameters setting of PSO

参数	粒子数	迭代次数	学习因子 $c_1$	学习因子 $c_2$	惯性权重
数值	100	200	1.5	1.5	0.8

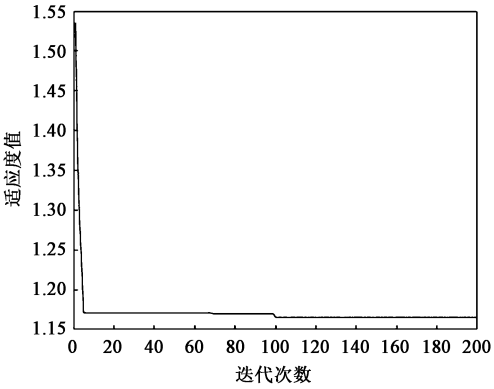


图 8 PSO 迭代适应度曲线  
Fig. 8 Iterative fitness curve of PSO

表 7 最佳工艺参数

Table 7 Optimum process parameters

参数	压边力 $F/\text{kN}$	凹模与板料间的摩擦因数 $\mu_1$	压边圈与板料间的摩擦因数 $\mu_2$
数值	606.991	0.1997	0.1252

3.2.4 优化结果评估

优化结果圆整后得到压边力为 607 kN、凹模与板料间的摩擦因数为 0.20 以及压边圈与板料间的摩擦因数为 0.13，将优化后的工艺参数代入仿真模型计算零件的减薄率，并与初始模型（参数优化前的仿真模型）计算值、BP 神经网络代理模型预测值进行对比，如图 9 所示。可以看出，优化后零件的

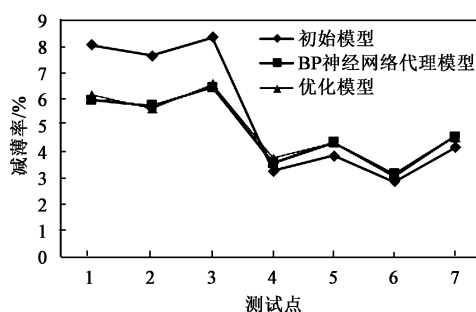


图 9 各模型减薄率对比

Fig. 9 Comparison of thinning rates for various models

最大减薄率降低，整体减薄率更加均匀，成形质量更加优异。

平均绝对百分比误差  $MAPE$  是所有单个预测值与算术平均值的平均偏差的绝对值。平均绝对百分比误差可以避免误差相互抵消的问题，因而可以准确地反映实际预测误差的大小。其计算公式如下：

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{|p_i - t_i|}{t_i} \right) \quad (1)$$

式中： $m$  为数据维度； $p_i$  为预测值； $t_i$  为实际值。

经计算，优化模型各测试点的减薄率的实际值与预测值的平均绝对百分比误差  $MAPE$  为 2.49%，满足优化精度要求。

### 3.3 工艺验证

采用该工艺参数进行工艺试验，一次即可成形出合格零件。为了验证仿真模拟结果的准确性，将试验件进行剖分，测量 7 处样本测试点的厚度，测量结果如图 10 所示。实际减薄率与仿真模拟结果基本相符，法兰圆角区的减薄率略小于仿真结果，分析可能与试验中该处润滑相关，顶部下陷区的减薄率略大于仿真结果，可能是试验中为了保证零件与模具的贴合效果，使得整形力较大及保压效果稍长

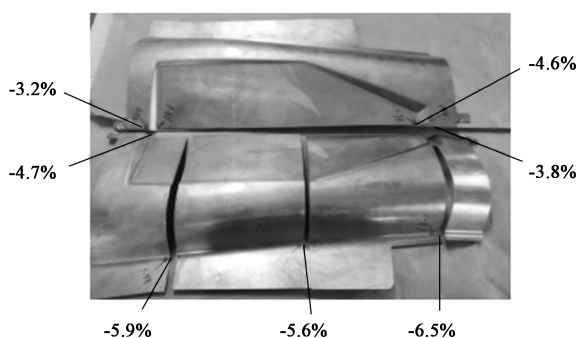


图 10 零件实际减薄率分布图

Fig. 10 Distribution diagram of actual thinning rate for part

导致的。7 个测试点的实际减薄率与仿真预测值结果的相对误差为 0.0%~4.8% 不等，二者误差较小，验证了有限元仿真模型的准确性，同时也证实了 BP 神经网络优化方法的有效性。

## 4 结论

(1) 对于复杂曲面的钣金构件，合理的工艺补充能够很好地控制材料流动，改善减薄、起皱等缺陷。

(2) 基于 BP 神经网络对目标零件进行参数优化，得到的最佳工艺参数组合为：压边力为 607 kN、凹模与板料间的摩擦因数为 0.20 以及压边圈与板料间的摩擦因数为 0.13，优化后零件的成形效果得到改善且减薄率的实际值与预测值的平均绝对百分比误差为 2.49%，优化精度满足要求。

(3) 采用优化后的工艺参数进行工艺试验，仿真结果与实际值相对误差不大于 4.8%，验证了仿真模型的准确性，也证实了 BP 神经网络优化方法的有效性。

### 参考文献：

- [1] 曾元松. 航空钣金成形技术 [M]. 北京：航空工业出版社，2014.  
Zeng Y S. Aeronautical Sheet Metal Forming Technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [2] 职业技能培训 MES 系列教材编委会. 冷作钣金工技能 [M]. 北京：航空工业出版社，2008.  
Editorial Board of MES Series Textbooks for Vocational Skills Training. Cold Working Sheet Metal Skills [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.
- [3] 邱超斌, 郭庆磊, 郎利辉, 等. 铝合金船形深腔薄壁构件充液成形变形规律研究 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (1): 133-138.  
Qiu C B, Guo Q L, Lang L H, et al. Deformation regularity of aluminum alloy boat shaped deep-cavity and thin-walled part in hydroforming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (1): 133-138.
- [4] 曾一畔, 董锦亮, 宋炳毅, 等. 飞机复杂曲面蒙皮零件充液拉深技术研究 [J]. 精密成形工程, 2019, 60 (3): 65-71.  
Zeng Y P, Dong J L, Song B Y, et al. Hydrodynamic deep drawing for complex curved skin part of aircraft [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 60 (3): 65-71.
- [5] 束飞, 拓建峰, 张宇岑, 等. 飞机铝合金深锥型面零件多道次充液拉深技术 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (5): 98-104.  
Shu F, Tuo J F, Zhang Y C, et al. Multi-step hydrodynamic deep drawing of aluminium alloy conical part with deep cavity [J].

- Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (5): 98-104.
- [6] 曾一畔, 董锦亮, 何腾达, 等. 变曲率抛物线型零件充液拉深工艺优化 [J]. 机械科学与技术, 2017, 36 (S1): 70-74.  
Zeng Y P, Dong J L, He T D, et al. Process optimization of hydrodynamic deep drawing of variable curvature parabolic part [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36 (S1): 70-74.
- [7] 孟宝, 万敏, 吴向东, 等. 板材充液拉深动态加载系统开发与应用 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (24): 60-66.  
Meng B, Wan M, Wu X D, et al. Development of dynamic loading system for sheet metal hydrodynamic deep drawing and its application [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (24): 60-66.
- [8] 孙志莹, 郎利辉, 孔德帅. 铝合金马鞍形件充液成形工艺模拟分析 [J]. 精密成形工程, 2015, 7 (1): 46-50, 65.  
Sun Z Y, Lang L H, Kong D S. Simulation analysis of hydroforming process of aluminum alloy saddle parts [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7 (1): 46-50, 65.
- [9] 徐龙, 束飞, 龚甘霖, 等. 复杂钣金零件充液拉深工艺分析与试验研究 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (6): 49-53.  
Xu L, Shu F, Gong G L, et al. Process analysis and experimental investigation on hydroforming of complex sheet metal parts [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (6): 49-53.
- [10] 王媛, 李志强, 姚吉威. 深腔类航空钣金件成形工艺研究及应用 [J]. 制造技术与机床, 2021, (12): 81-84.  
Wang Y, Li Z Q, Yao J W. Research and application of the forming process of deep cavity aviation sheet metal [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021, (12): 81-84.
- [11] 韩龙帅, 王刚, 郑学斌, 等. 基于 Autoform 的门内板冲压仿真分析 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (4): 82-88.  
Han L S, Wang G, Zheng X B, et al. Simulation analysis of door inner panel stamping based on Autoform [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (4): 82-88.
- [12] 于宏辉. 钣金凸包冲压成形的仿真研究 [J]. 机械制造, 2019, 57 (7): 58-61, 75.  
Yu H H. Simulation study on stamping & forming of sheet metal convex closure [J]. Machinery, 2019, 57 (7): 58-61, 75.
- [13] 王玲, 张晓嵩, 赵天章, 等. 局部激光热处理辅助充液成形航空口框类零件的研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6): 93-97.  
Wang L, Zhang X S, Zhao T Z, et al. Research on local laser heat treatment-assisted hydroforming for aeronautical buccal frame parts [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 93-97.
- [14] Guo Y H, Xie Y M, Wang D T, et al. An improved damage-coupled viscoplastic model for predicting ductile fracture in aluminum alloy at high temperatures [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296: 117229.
- [15] Naceur H, Guo Y Q, Batoz J L, et al. Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43 (10): 2407-2434.
- [16] 张华伟, 郑晓涛. 基于遗传算法优化神经网络的拼焊板压力预测 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2020, 41 (2): 241-245.  
Zhang H W, Zheng X T. Blank holder force prediction of tailor welded blank based on neural network optimized by genetic algorithm [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2020, 41 (2): 241-245.
- [17] Xie Y M, Du L F, Zhao J B, et al. Multi-objective optimization of process parameters in stamping based on an improved RBM-BPNN network and MOPSO algorithm [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64 (6): 4209-4235.
- [18] 李洸泉. 金属板料成形有限元模拟基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.  
Li L G. Finite Element Simulation Basis of Sheet Metalforming [M]. Beijing: Beihang University Press, 2008.
- [19] 焦欣, 吴越武. 基于正交试验工艺参数对门内板成形性的影响 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (12): 73-81.  
Jiao X, Wu Y W. Influence of process parameters on formability of door inner panel based on orthogonal test [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (12): 73-81.
- [20] 蒋磊, 王龙, 李十全, 等. 基于正交试验的侧围外板拉伸成形工艺参数优化研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2021, (9): 42-50.  
Jiang L, Wang L, Li S Q, et al. Research on optimization of drawing process parameters for side outer panel based on orthogonal test [J]. Automobile Technology & Material, 2021, (9): 42-50.

### 警惕不法网站，保障投稿安全

近期，本刊接到多名作者投诉，网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站，如 [www.dyjszz.cn](http://www.dyjszz.cn)，这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息，误导和欺骗广大投稿作者，骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息，侵犯了广大作者的切身权益。

特此声明，本刊唯一官方网站为 [www.fstjournal.net](http://www.fstjournal.net)，投稿方式为网站注册登录投稿，不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站，谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为，否则将严肃对待，并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为，一经发现，请联系本刊，本刊将及时处理，共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式：fst@263.net；010-62920652。

《锻压技术》编辑部