

分类号: TG386.1

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120173



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 轿车后车门内板冲压工艺参
数优化及其模具寿命研究

论 文 作 者 宫国庆

校 内 导 师 王幼民（教授）

校 外 导 师 王菲（高级工程师）

专业学位类别 机械

研究方向（领域） 智能制造系统

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号: TG386.1

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120173

轿车后车门内板冲压工艺参数优化及其模具寿命研究

RESEARCH ON STAMPING PROCESS PARAMETERS OPTIMIZATION AND DIE LIFE OF CAR REAR DOOR INNER PANEL

学生姓名: _____ 宫国庆

指导教师: _____ 王幼民 (教授)

校外教师: _____ 王菲 (高级工程师)

专 业: _____ 机械

研究方向: _____ 智能制造系统

论文答辩日期: _____ 2024 年 5 月 18 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：宫国庆

日期：2024年5月31日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在_____年解密后适用本版权书

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：宫国庆

指导教师签名：王为民

日期：2024年5月31日

日期：2024年5月31日

轿车后车门内板冲压工艺参数优化及其模具寿命研究

摘 要

随着轿车生产技术的不断提高, 车身覆盖件的成形质量成为了技术人员重点研究内容。汽车的覆盖件的尺寸较大, 结构复杂, 但需求量比较高, 所以汽车覆盖件的设计尤为重要。拉延工序是制件冲压工艺路线的第一步, 而拉延模具表面的磨损对制件的生产质量有较大的影响。减少模具磨损量不仅可以降低成本, 延长模具寿命, 还可以提高制件的成形质量。

本文以轿车后车门内板为研究对象, 设计了轿车后车门内板的三维数模和制件的拉延模具, 基于 Autoform 对轿车后车门内板的拉延过程仿真模拟, 建立最大减薄率和最大起皱率的响应面模型并进行优化模型的寻优求解。利用 Deform-3D 对板料与拉延模具的表面摩擦产生的磨损情况进行模拟仿真, 利用信噪比分析法对工艺参数进行局部优化, 建立 BP 神经网络后利用 FA-BP 神经网络对工艺参数进行全局优化, 最终得到最优工艺参数组合。本文的具体研究内容如下:

(1) 设计了轿车后车门内板结构。拟定了制件的冲压工艺路线, 对拉延过程中板料的主要参数及工艺力进行简单的计算, 建立了轿车后车门内板的拉延模具的三维数模和装配图。

(2) 利用 Autoform 对轿车后车门内板进行成形过程的仿真模拟。把制件导入仿真软件进行预成形仿真, 通过设置几段不同的拉延筋后再次进行模拟, 得到的模拟结果是制件的最大减薄率和最大起皱率明

显减小。

(3) 建立了以制件成形质量为因变量的单目标函数并找到了制件成形质量的优化模型。构建了最大减薄率和最大起皱率的响应面模型，将这两个多目标模型转化为单目标优化模型，经过优化，找到了制件成形质量最佳时的工艺参数组合。

(4) 设计了以模具的磨损量为目标的田口正交试验并得到了拉延模具表面磨损经验公式。基于 Deform-3D 对模具的磨损过程进行仿真分析，设计了四因素四水平的正交试验，利用信噪比优化得到了模具磨损量最小制件成形最优工艺参数组合，通过 SPSS 线性回归分析得到模具磨损的经验公式。

(5) 搭建了四输入一输出 BP 神经网络模型和优化后的 FA-BP 神经网络得到全局中的最优工艺参数组合。利用萤火虫算法优化神经网络的权值和阈值，建立了更准确的 FA-BP 神经网络并预测模具的最小磨损量，得到了全局的制件成形最优工艺参数，最后通过仿真模拟验证结果的准确性。

关键词：轿车后车门内板，拉延工序，响应面模型，工艺参数优化，正交试验，FA-BP 神经网络

RESEARCH ON STAMPING PROCESS PARAMETERS OPTIMIZATION AND DIE LIFE OF CAR REAR DOOR INNER PANEL

ABSTRACT

With the continuous improvement of car production technology, the forming quality of body covering parts has become a key research content for technicians. The size of the car's covering parts is large, the structure is complex, but the demand is relatively high, so the design of the car's covering parts is particularly important. The drawing process is the first step of the stamping process route of the parts, and the wear of the surface of the drawing die has a greater impact on the production quality of the parts. Reducing the wear of the die can not only reduce the cost and prolong the service life of the die, but also improve the forming quality of the parts.

In this master 's thesis, the rear door inner panel of the car is taken as the research object, and the three-dimensional digital model of the rear door inner panel of the car and the drawing die of the product are designed. Based on Autoform, the drawing process of the car rear door inner panel is simulated. The response surface model of the maximum thinning rate and the maximum wrinkling rate was built and the

optimization model is solved. Deform-3D was used to simulate the wear caused by the surface friction between the sheet and the drawing die. The signal-to-noise ratio analysis method was used to optimize the process parameters locally. After the BP neural network was established, the FA-BP neural network was used to optimize the process parameters globally, and finally the optimal process parameter combination was obtained, and the prime research content of this master 's thesis is as follows:

(1) The inner panel structure of car rear door was designed. The stamping process route of the parts was drawn up, and the main parameters and process forces of the sheet during the drawing process were simply calculated. The three-dimensional digital model and assembly drawing of the drawing die for the inner panel of the rear door of the car were established.

(2) The forming process of car rear door inner panel was simulated by Autoform. The part was imported into the simulation software for preforming simulation. By setting several different drawbeads, the simulation was carried out again. The simulation results showed that the maximum thinning rate and the maximum wrinkling rate of the part were significantly reduced.

(3) The single objective function with the forming quality as the dependent variable was established and the optimization model of the

forming quality was found. The response surface model of the maximum thinning rate and the maximum wrinkling rate was built. These two multi-objective models were converted to the single-objective optimization function, and the optimal combination of process parameters with the highest forming quality was obtained.

(4) The Taguchi orthogonal experiment with the target of the wear amount of the die was designed and the empirical formula of the surface wear of the drawing die was obtained. Based on Deform-3D, the wear process of the die was simulated and analyzed, and the orthogonal test of four factors and four levels was designed. The optimal combination of process parameters for the forming of parts with minimum die wear was obtained by signal-to-noise ratio optimization. The empirical formula of die wear was obtained by SPSS linear regression analysis.

(5) A four-input-one-output BP neural network model and an optimized FA-BP neural network were built to obtain the optimal combination of process parameters in the global. The firefly algorithm was used to optimize the weights and thresholds of the neural network, and a more accurate FA-BP neural network was established to predict the minimum wear of the mold, and the global optimal process parameters of the part forming were obtained. Finally, the accuracy of the results was verified by simulation.

KEY WORDS: car rear door inner panel, drawing process, response surface model, process parameter optimization, orthogonal test, FA-BP neural network

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 轿车后车门内板研究背景及意义	1
1.2 轿车后车门内板冲压成形及拉延模具磨损国内外研究现状	1
1.2.1 板料冲压成形有限元数值模拟的国内外研究现状	2
1.2.2 冲压成形工艺参数优化国内外研究现状	3
1.2.3 冲压模具磨损国内外研究现状	4
1.3 本文研究目的及研究内容	5
1.3.1 研究目的	5
1.3.2 研究内容	5
第 2 章 轿车后车门内板及其拉延模具结构设计与分析	8
2.1 轿车后车门内板结构分析	8
2.2 工艺方案的确定	9
2.3 轿车后车门内板工艺计算及主要参数的确定	12
2.3.1 轿车后车门内板毛坯确定	13
2.3.2 轿车后车门内板拉延工艺力的计算	13
2.3.3 轿车后车门内板模具间隙的确定	14
2.3.4 轿车后车门内板拉延模的行程	15
2.4 轿车后车门内板拉延模具设计方案	15
2.4.1 轿车后车门内板拉延模具	15
2.4.2 轿车后车门内板拉延模的导向	16
2.4.3 轿车后车门内板拉延模具设计	17
2.4.4 下模的结构设计	18
2.4.5 压边圈的结构设计	19
2.4.6 凹模的结构设计	19
2.4.7 轿车后车门内板拉延模装配图	20

2.5 本章小结	21
第 3 章 基于 Autoform 的轿车后车门内板拉延成形仿真模拟	22
3.1 AutoForm 软件分析思想	22
3.2 轿车后车门内板拉延预成形仿真模拟	23
3.2.1 零件的导入	23
3.2.2 冲压方向的确定	23
3.2.3 材料设置	24
3.2.4 拉延设置	24
3.2.5 工具体设置	25
3.2.6 轿车后车门内板预成形仿真结果分析	25
3.3 设置拉延筋后的轿车后车门内板的成形仿真模拟	27
3.3.1 拉延筋的作用	27
3.3.2 设置拉延筋后的仿真模拟	28
3.4 本章小结	29
第 4 章 轿车后车门内板成形工艺参数优化	31
4.1 响应面法简介	31
4.1.1 试验设计	31
4.1.2 响应面模型的建立	32
4.1.3 精度检验	32
4.2 轿车后车门内板成形工艺参数优化	33
4.2.1 试验因素	33
4.2.2 评价指标的确定	34
4.3 BBD 试验设计及结果	34
4.4 响应面模型建立	36
4.5 响应面模型精度检验	38
4.6 制件成形质量优化模型	39
4.7 优化结果	41
4.8 本章小结	43
第 5 章 轿车后车门内板拉延模具磨损过程及磨损量研究	44

5.1 冲压模具磨损理论	44
5.1.1 冲压模具的失效形式	44
5.1.2 磨损种类	45
5.2 拉延模具三维模型的建立及导入	45
5.3 网格划分及无关性证明	46
5.4 仿真模拟	48
5.4.1 约束与边界条件的设置	48
5.4.2 步长设置	50
5.4.3 初次仿真模拟结果分析	50
5.5 轿车后车门内板拉延模具磨损因素研究	51
5.5.1 各个成形工艺参数对模具磨损量的影响	51
5.5.2 田口正交试验设计	52
5.5.3 信噪比分析法	54
5.5.4 优化结果分析	57
5.6 模具磨损量经验公式建立	57
5.6.1 多元线性回归模型建立	57
5.6.2 统计试验值与计算值	59
5.7 本章小结	61
第 6 章 基于 BP 神经网络和萤火虫算法的工艺参数优化	63
6.1 模具磨损量的预测方法	63
6.2 试验样本的选取	64
6.3 BP 神经网络的搭建	65
6.3.1 输入层与输出层的确定	65
6.3.2 隐含层节点数与激活函数的选取	65
6.3.3 神经网络训练的算法	67
6.3.4 创建模具磨损量的 BP 神经网络模型	67
6.3.5 BP 神经网络的验证	68
6.4 FA-BP 神经网络的搭建及验证	70
6.4.1 萤火虫算法概括	70

6.4.2 FA-BP 神经网络的搭建与验证	71
6.5 基于模具磨损量最小的 FA-BP 神经网络的工艺参数优化	73
6.6 本章小结	75
第 7 章 总结与展望	76
7.1 总结	76
7.2 展望	77
参考文献	79
附录I 全面仿真试验数据表	86
攻读硕士期间发表的学术成果	88
致谢	89

第 1 章 绪论

随着科学技术的发展，模具 CAE 技术越来越成熟，许多汽车生产产商利用 CAE 技术对生产的汽车零件进行仿真模拟，以此来减少零件的破损率，提高零件的成形质量，同时利用模具 CAE 技术探究模具的磨损量的问题，降低模具的磨损量，延长模具的使用寿命。轿车后车门内板零件是本次研究的重点，旨在探究最优工艺参数组合，以实现最佳成形质量和延长模具寿命。

1.1 轿车后车门内板研究背景及意义

近几年，随着汽车的普及，汽车覆盖件的模具的设计也成为了一个非常热门的行业，由于汽车的覆盖件的模具较大，结构复杂，但是需求量又比较高，因此，对车身覆盖件进行冲模设计就显得非常重要。由于其在冲压、冲压、模具等方面都有自己独特的特征，所以将其作为一个特殊的问题进行研究。

拉伸是汽车覆盖件冲压成形过程中最重要的一道工序，其设计是否合理直接关系到后续加工过程的质量^[1]。汽车覆盖件是一种大型、复杂的型面，但对其具有较高的尺寸精度和良好的型面。但其冲压变形过程十分复杂，若不恰当地选取工艺参数，极易出现起皱、开裂和回弹等缺陷，从而导致产品的研制周期和研制成本上升^[2]。

随着拉伸模具的不断使用，生产车间的恶劣的环境，加上不断生产加工过程中摩擦力的影响，拉伸模具的表面造成严重的磨损，严重的可能造成模具的破坏，最终导致生产出来的汽车零件精度不足，质量有比较大的缺陷而不能使用。所以工程师们在不断寻找可以延长拉伸模具寿命的方法，通过不断优化工艺参数，找到最优的工艺参数组合，减小加工过程中对拉伸模具的磨损，尽量使模具的磨损量降到最低，延长模具的使用寿命^[3]。

1.2 轿车后车门内板冲压成形及拉伸模具磨损国内外研究现状

轿车后车门内板的成形质量对汽车制造业有着重要的影响，拉伸模具的磨损将影响零件生产的成本与效率。

1.2.1 板料冲压成形有限元数值模拟的国内外研究现状

CAE 技术深入应用显著提升了工作效率，为工业发展注入了新的活力。许多难以执行的设计和制造过程可以使用更多的方法进行模拟，例如，结合统计工具（回归分析、方差分析、田口方法、深度学习）、在设计周期中早期应用的有限元分析、基于 CAD 的设计优化工具，以及基于 CAM 的工具进行加工优化。在汽车覆盖件冲压工艺参数优化及模具磨损的分析方面，可以利用 CAE 技术对此进行模拟仿真并得到数值模拟的结果，除了实验研究之外，开发准确和高效的模型在制造工艺领域是相当重要的^[4-5]。

早在 20 世纪 60 年代，RayW.Clough 教授^[6]有限元法第一次被提出，同时将应用范围扩展到航空航天以外的工程上，此后，有限元方法得到了快速的发展，Lee^[7]于 1973 年提出刚塑性有限元方法用于解决冲压成形问题。随着 20 世纪 80 年代有限元理论技术的逐渐成熟，数值模拟技术被广泛应用于车身覆盖件的拉延成形中，有效解决了实际工程问题^[8]。1981 年，美国福特公司率先开展了整车车身覆盖件冲压成形过程的模拟。随后，Tang^[9]创新性地将弹塑性有限元方法应用于汽车行李箱盖的拉延成形模拟分析，进一步推动了有限元方法在汽车工业中的应用与发展。20 世纪 90 年代，板料成形模拟技术取得显著进展，特别是在非线性接触与摩擦问题的算法搭建上实现了重大突破，推动了模拟技术的进一步发展和应用^[10]；第二，建立标准的有限元冲压模型，并通过与实际冲压过程的对照验证其有效性。该模型能利用有限元软件预测冲压过程中可能出现的拉裂、起皱和回弹等质量缺陷，为优化冲压工艺提供了可靠依据；第三，针对板料成形问题，已研发出专业的有限元仿真软件，其中 PAMSTAMP、Dynaform 和 AutoForm 等成为业界翘楚^[11]。

为缩小与欧美国家在有限元数值模拟技术上的差距，国内高校与企业正联合开发商业 CAE 软件，推动该领域技术的快速发展^[12]。北京航空航天大学与一汽企业合作研发的 SHEETFORM 软件，以及华中科技大学自主创新的 FASTAMP 软件，在新产品开发中得到广泛应用，推动了国内数值模拟技术的革新与发展^[13]。

综上所述，在工业领域中 CAE 技术得到了广泛应用，不仅提高了工程师和研究人员的效率，还推动了研究活动达到更高的性能水平。这些软件在高校和车企中得到了广泛应用，为板料成形研究提供了有力工具，推动了相关领域的

技术进步和应用发展。

1.2.2 冲压成形工艺参数优化国内外研究现状

针对汽车覆盖件冲压成形质量好坏的问题,国内外研究人员利用不同的优化方法对汽车覆盖件成形的质量进行优化^[14],随着人工智能算法的发展,研究人员把智能算法与模型的优化相结合,寻找不同的评判标准代表成形的质量,最终为了提高汽车覆盖件的成形质量,为后续的生产制造提供指导工作^[15]。F.-Z. Oujebbour^[16]等人为了优化回弹和失效这两个板料制造过程中的质量缺陷,选择了全局方法。他结合了 SA 和 SPSA 两个算法,以获得在时间和精度上的增益。Tushar Y. Badgajar^[17]等人把有限元分析的方法和多元回归分析的方法相结合,多元回归分析是用来建立响应和预报因子之间关系的数学技术,回归分析用于优化参数使坯料减薄量最小,有限元分析和回归分析来研究各种参数及其交互作用对钣金减薄的影响,通过零件的实验生产,验证了冲压工艺参数优化方法的有效性。Senouci Ahlam^[18]等人提出了两个有用的设计辅助工具进化算法和神经网络集成进化算法来解决回弹量最小化问题,采用两种优化方法进行求解,能在一次运行中产生多个最优解,这与提供单一解的大多数可用优化方法不同,可以用于解决板料成形领域的多种参数优化问题。

Shumei Lou^[19]应用响应面方法(RSM)来研究模拟结果,并讨论五个工艺参数(即坯料直径、坯料预热温度、模具温度、容器温度和滑块速度)对上梁的铝型材出口速度分布均匀性的影响。同时还研究了这五个参数之间的相互作用,此外,还建立了挤压工艺参数与出口速度均匀性评价标准之间的二阶响应面模型。通过响应面模型优化了工艺参数,目的是找到最均匀的出口速度分布。Ming dong Huang^[20]采用中心组合实验设计方法设计仿真矩阵,为了获得成形质量最优的冲压零件,采用响应面法建立了冲压参数与成形质量(破裂和回弹)的关系,根据数学模型可以分析工艺参数对破裂和回弹的影响。U. Mohammed Iqbal^[21~22]采用响应曲面法建立了经验关系式,以优化成形特性。经验关系表明,道次是影响抗拉强度和硬度等输出参数的最显著因素。

综上所述,以上人员利用多元回归模型对零件的成形质量进行优化,但是并没有并未考虑优化所得到的寻优模型,其得到的优化结果为局部较优而非全局最

优结果。研究人员利用响应面模型分别对两个及两个以上不同的评价指标建立模型，但是并没有把两个多目标函数转换为一个单目标函数，没有多目标寻优的过程。

1.2.3 冲压模具磨损国内外研究现状

模具的磨损问题与模具的寿命息息相关，目前对于模具磨损的问题，国内外研究人员通过不同的方法进行探究，研究模具磨损的次数，模具磨损的主要位置，模具的寿命等等，一般通过数值模拟的技术来研究模具磨损的主要影响因素及程度，可以为延长模具寿命提供参考意见。

T Trzepiecinski^[23~24]等人基于有限元的冲压工具磨损分析进行了研究。对钢板厚度为2 mm的深层拉伸优质钢板进行了分析。在数值模拟中应用了统 Archard 模型，证明了在钣金成形过程中进行刀具磨损模拟的可能性。In-Kyu Lee^[25]等人评估了一种用于冲压超高强度钢的新型模具材料的磨损和疲劳特性，通过超高强度钢冲压有限元分析和实验对模具磨损进行评估。V. Naranje^[26]等人利用人工神经网络（ANN）预测深冲模具寿命的研究工作。通过有限元（FE）分析研究了影响深冲模寿命的参数。基于有限元分析结果，采用应力幅值（S）与失效周期（N）的方法预测深冲模具的循环次数，循环次数给出了深冲模具在失效之前可以使用其生产的钣金零件的数量。

Gan Lei^[27]针对随着模具的磨损，一成不变的模型无法反映过程的实际状态，不准确的模型会导致研究的失败的问题，提出了一种考虑模具磨损的冲压成形数字孪生驱动建模方法。在虚拟空间中建立了考虑系数随模具磨损状态变化的冲头力和成形质量的模型。Zheng Xuewen^[28~29]提出了一种考虑高温磨损的修正 Archard 磨损模型。通过将仿真结果与试验磨损深度进行对比，表明新的磨损模型能够准确预测 5CrMnMo 钢在高温销盘磨损试验中的磨损情况。应用响应面法 (RSM)对法兰叉预成形模具的几何参数进行优化，以降低模具磨损，延长模具寿命。Cheng Yaonan^[30~31]为了提高刀具磨损在线预测的精度，提出一种基于鲸鱼优化算法优化支持向量机的刀具磨损预测新方法，与传统的算法比较，预测精度和稳定性更高，泛化性更强。这些发现对于零件加工质量和效率的提高、制造系统的稳定运行以及制造业的智能化发展可能具有重要意义。

综上所述，以上人员利用 Archard 模型对模具磨损进行了模拟，但是没用利用建立 BP 神经网络与工艺参数之间的关系来寻求最优工艺参数组合，并且研究人员利用不同的方法对模具磨损量的优化是单一方面的优化，只探究某一个方面，但是都未曾探究不同的工艺参数组合对模具磨损量的影响的大小，没有在全局范围内对模具的最小磨损量进行寻优求解。

1.3 本文研究目的及研究内容

轿车后车门内板零件是本文研究的重点，旨在探究最优工艺参数组合，以实现最佳成形质量和延长轿车后车门内板拉伸模具寿命。

1.3.1 研究目的

本文以轿车后车门内板为研究对象，采用 CATIA 对零件进行 3D 建模和 UG 对拉伸模具进行建模，基于 Autoform 软件对零件拉伸成形的过程进行仿真模拟，通过响应面法把多目标函数转换成单目标函数的优化模型进行工艺参数优化，基于 Deform-3D 进行模具在拉伸过程中的磨损情况仿真模拟，通过信噪比分析法优化了工艺参数组合，建立了以多元线性回归方程为模具磨损的经验公式，利用萤火虫算法优化 BP 神经网络以预测模具最小磨损量，对冲压过程中的成形工艺参数进行优化。

1.3.2 研究内容

利用 CATIA 软件构建了轿车后车门内板的三维模型，随后通过 UG 设计拉伸模具的整体结构。采用 Autoform 软件对轿车后车门内板的拉伸成形过程进行了仿真模拟，并通过 BBD 试验优化了工艺参数，建立了最大起皱率和最大减薄率的响应面模型。为了优化零件的成形质量，将多目标二次响应面函数转化为单目标函数。此外，利用 Deform-3D 软件研究了模具在拉伸过程中的磨损情况，并通过信噪比分析了不同工艺参数对模具磨损量的影响。为了寻找最优工艺参数组合，采用萤火虫算法优化了 BP 神经网络。通过仿真模拟软件的验证，得到了最佳的工艺参数组合，实现了零件成形质量的最大化和模具磨损量的最小化。具体研究内容如下：

第 2 章 简要分析了轿车后车门内板的结构，根据零件加工成形过程拟定了轿车后车门内板的冲压工艺路线，确定了拉延过程中板料的主要参数及工艺的简单计算过程，依据汽车覆盖件拉延成形的生产要求及模具设计标准设计了轿车后车门内板拉延模具的方案，分别对拉延模具中的凸模，凹模和压边圈作出了具体的设计要求，最后对模具进行了装配。

第 3 章 简单介绍了 Autoform 软件的功能，基于 Autoform 软件对轿车后车门内板进行预成形仿真模拟，通过一些分析步骤后得到预成型仿真模拟的结果。通过对轿车后车门内板设置几段不同的拉延筋，再次利用仿真软件进行模拟，最终得到了设置拉延筋后的零件成形质量的结果。

第 4 章 基于 Design-Expert 软件进行了对试验因素的响应面分析，以模具间隙、摩擦系数和压边力为试验因素，以最大减薄率和最大起皱率作为评价指标，采用了三因素三水平的 Box-Behnken 试验方案，分别建立两个评价指标的响应面模型，对响应面模型进行检验是可行的，把两个多目标函数的模型转换成一个单目标函数的模型，找到了一个使制件成形质量达到最佳的优化模型，利用优化模型进行求解，找到多目标函数模型的最优解，把最优的工艺参数组合带入到 Autoform 进行检验，得到了最优的零件成形的评价指标，零件的成形质量控制在较好范围之内。

第 5 章 论述了冲压模具的磨损理论和失效形式，利用 Deform-3D 软件，成功完成了轿车后车门内板拉延模具磨损的仿真模拟。深入分析了模具间隙、摩擦系数、冲压速度和模具硬度等因素对模具磨损的影响。通过设计田口正交试验，并结合信噪比分析法，有效优化了工艺参数对模具磨损量的影响，得到了最优工艺参数组合。进一步，采用 SPSS 进行线性回归分析，建立了工艺参数与模具磨损量之间的经验公式，经过试验数据的比较验证，该经验公式具有高度的准确性。

第 6 章 分析了几种模具磨损量的预测方法，通过筛选优化三个关键水平因素，构建了工艺参数与模具磨损量的 BP 神经网络模型。随后，运用萤火虫算法精细调整模型权值和阈值，形成了预测性能更佳的 FA-BP 神经网络模型。此模型有效预测了模具磨损的最小值，并确定了全局最优工艺参数组合，最后通过 Deform-3D 进行模拟仿真来验证，减少了了冲压模具的磨损量，提高了冲压模具的使用寿命。

第 7 章 对本文所做的工作做了简要的总结，并提出亟待解决的问题希望加以研究。

第 2 章 轿车后车门内板及其拉延模具结构设计与分析

轿车后车门内板通常采用冷冲模进行浅拉深成形，采用冷轧薄板作为内覆盖件。由于其自身结构形状非对称，材质尺寸较小，几何形状复杂，尺寸、外形及表面质量要求较高，且含尖角及窗口，刚性好，局部成形较多，成形难度大，成形加工中易产生开裂、起皱等问题。CAE 模拟仿真技术可以对制造工艺中可能存在的问题进行预判，从而对模具的研发起到一定的引导作用，从而减少了模具试模的数量，节省了时间，确保了产品的质量。

2.1 轿车后车门内板结构分析

汽车覆盖件具有弧面多，板料薄和几何空间结构复杂等特点。本论文中的零件是某型号轿车后车门内板，要求零件表面光滑平顺、棱线清晰，无褶皱、凹陷、凸包、波浪等缺陷^[32]，图 2-1 所示为利用 CATIA 软件设计的某轿车后车门内板三维模型原始数模，其基本尺寸参数为：长 1280mm、宽 1108mm、零件上下最大高度差 200mm。如图 2-1 所示，此制件外形复杂，高度落差大，局部成形量大，板材变形并非简单的拉延，还伴有一定的翻边、冲孔、修边等，属于汽车覆盖件的典型代表。因为该产品需要安装一些其他小型部件，例如汽车音箱和把手等，并与金属冲压件相匹配，所以对其精度提出了更高的要求，因此通过 CAE 仿真模拟轿车后车门内板的冲压成形过程十分重要。

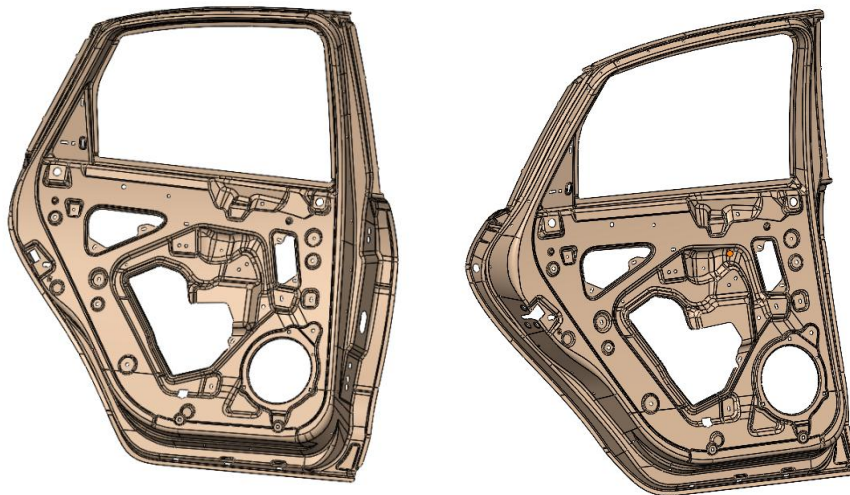


图 2-1 轿车后车门内板零件图

2.2 工艺方案的确定

冲压工艺过程的设计基本步骤如图 2-2 所示。轿车后车门内板外形复杂、尺寸庞大，无法一次成型，需经过多道工序加工。冲压成形一般的工序有弯曲、拉伸、翻孔、修边、翻边、冲孔等^[33]。为了确保产品的质量和满足不同的需求，需要选用合适的冲压工艺。

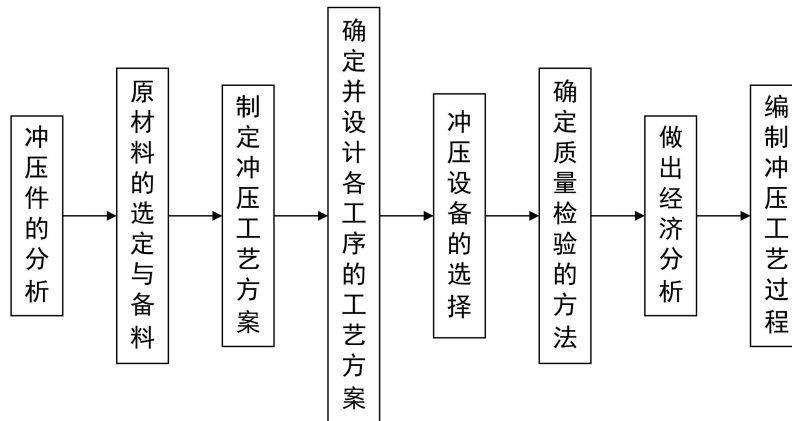


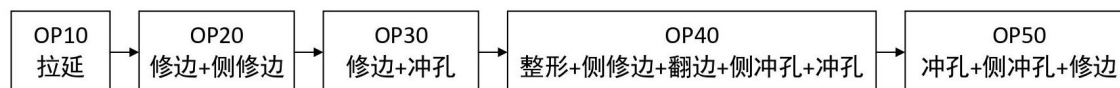
图 2-2 冲压工艺过程的设计基本步骤图

通过对轿车后车门内板的结构分析得到其冲压成形难度较大，具有一定的复杂性。轿车后车门内板是汽车外覆盖件典型的代表，其具有材料薄、曲面变化大、空间结构复杂、零件设计尺寸大等特点，并且要求成形面光滑平顺，为了不影响汽车整体美观和后续喷漆上色的质量，在冲压过程中应避免如起皱、波纹、凹痕、擦伤及其他成形缺陷的产生。

在设计轿车后车门内板冲压成形工艺与模具时，需全面考虑生产流程，包括落料、拉伸、冲孔到胀形、弯曲、修边、翻边等步骤。针对大尺寸制件，推荐采用多步骤复合模具以提升效率。材料、厚度、形状和尺寸等因素应严格把控。特别地，对于薄材料，压料和出料机构设计至关重要，需确保稳定传输和避免变形。冲裁、拉深间隙和高度需满足制造标准，同时确保凸凹模动作稳定连续。卸料装置设计应确保制件与废料排放互不干扰。轿车后车门内板的表面上面有很多的孔，比如钥匙锁孔，音响孔，门把手的孔等等，在冲孔和侧冲孔的工序中，需要仔细考虑孔加工顺序并合理设计冲孔工序，避免出现漏冲孔。

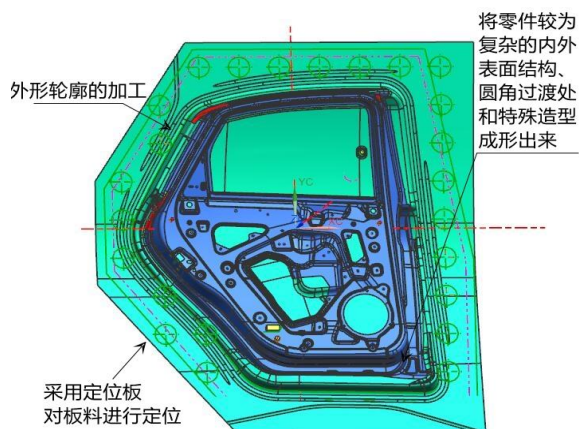
根据有以上分析，拟定两种工艺方案，分别为单工序冲压和复合工序组合冲压。单工序冲压工艺的生产的模具结构简单，制造周期短，制造简单，但需要多副模具，成本高而生产效率低，难以满足生产的要求。复合工序组合冲压虽然模

根据制件的结构及上述的分析, 利于成形且保证制件质量, 节约成本提高生产效率, 该制件的工艺方案如图 2-3 所示。



(1) 拉延工序

采用拉延工艺对某轿车后车门内板进行冲压成形,获得所需零件的外形如图2-4所示。拉延模具工作时,毛坯在凸模的带动下,逐步地向凹模模腔内移动,里面的毛坯逐步进行贴模,最终将其拉延成形,从而获得整个或很大一部分工件的外形。本文主要对拉延工序进行仿真分析,制件经过拉延工序时,应该按照拉延程序的一般程序:在拉伸工件的局部外形修正;拉延过程中的冲孔;方便后续加工等。



(2) 修边、侧修边

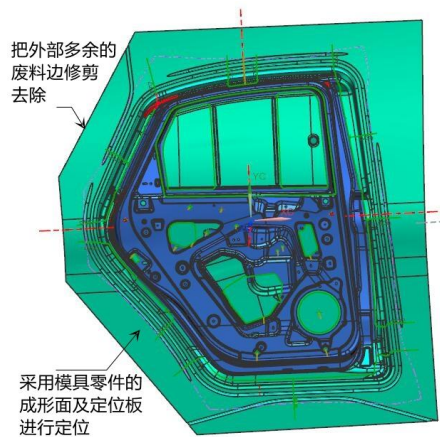


图 2-5 修边、侧修边工序简图

(3) 修边、冲孔

此工序是继续对拉延件的工艺补充部分及压料凸起剩余部分切除，冲孔是将废料沿着封闭的轮廓分离^[34]，从而获得一个有效的孔，由于轿车后车门内板的表面上面需要保留较多的其他孔，比如轿车音响的孔，门把手的孔，钥匙锁的孔等等，冲孔工序需要把内板中音响孔，锁孔等孔完全冲出为翻边和整形工序做准备如图 2-6 所示。

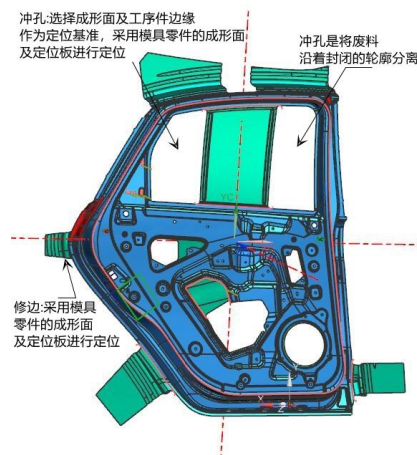


图 2-6 修边、冲孔工序简图

(4) 整形、侧修边、翻边、侧冲孔、冲孔

零件的外部轮廓都是有翻边的，而且有些地方的 R 角度很大。为了消除上述步骤中出现的毛刺，需要有整形翻边等加工操作。翻边是将板料按规定的曲线在毛坯的平部或弯曲部位进行翻边的一种冲压工艺。翻边一般是指在冲压过程中接近尾声的成形过程^[35]，而翻边整形则是对那些没有被拉深或能够被成形但后序不能处理的局部边线和轮廓进行处理，以增强覆盖件的刚性、对覆盖件间的匹配和焊接接头的形状进行加工，如图 2-7 所示。

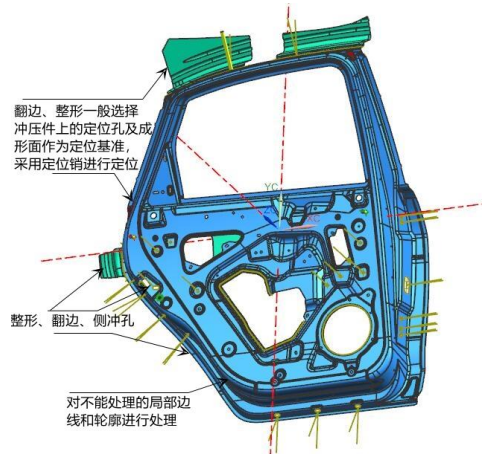


图 2-7 整形、侧修边、翻边、侧冲孔、冲孔工序简图

(5) 冲孔、侧冲孔、修边

在经过以上的一些冲压工艺的工序之后，轿车后车门内板零件整体外形轮廓已加工完毕，但是轿车后车门内板上含有许多孔，比如童锁孔，车窗的部分，门把手孔等等上述工序未冲完的孔，最后一道工序为冲孔。鉴于部分孔位于圆角过渡处，为确保孔的加工精度和零件的整体质量，采用了侧冲孔技术。此外，为避免零件表面出现毛刺，利用侧修边工艺进行了精细处理。经过这些步骤，成功完成了轿车车门内板零件的成形工作，零件质量达到预期要求，如图 2-8 所示。

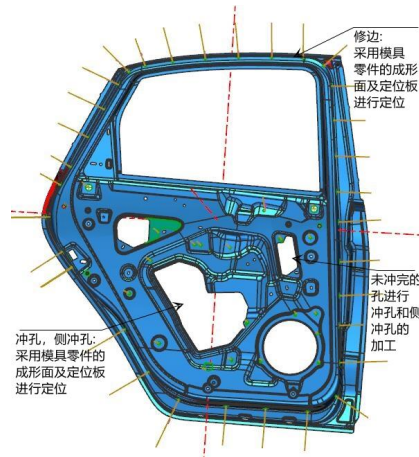


图 2-8 冲孔、侧冲孔、修边工序简图

2.3 轿车后车门内板工艺计算及主要参数的确定

轿车后车门内板属于拉延件，是由板料毛坯经过冲压工序而得到的，则需要选取合理参数进行工艺计算，才能够得到成形良好的车门内板零件。需要确定毛坯的尺寸，有效降低材料利用率，可以减少后续工序的工作量，拉延工艺力，模具间隙等等的计算，为后面的仿真模拟提供近似的参数，加快实际加工生产的进

度，从而有效提高产品生产速度^[36]。

2.3.1 轿车后车门内板毛坯确定

由 2.1 节可知，轿车后车门内板零件的最大尺寸为：长 1280mm、宽 1108mm、零件上下最大高度差 200mm。考虑到后面的修边，冲孔，翻边，整形等工序，这里需要在冲压加工的第一步工序即拉延工序中，将板料的尺寸定相比较大一点，方便后面的工序进行，得到相对较好的零件，因此设置板料毛坯尺寸为：最大宽度 1540mm，最小宽度 1410mm，板料的厚度为 0.7mm。

汽车覆盖件的材料通常是冷轧钢板，它的强度比较大，塑性变形能力较强。因此本文将选取 DC07 低碳钢作为轿车后车门内板的板料毛坯材料，DC07 的化学成分范围值和力学性能值如表 2-1 所示：

表 2-1 DC07 的化学成分范围值和力学性能值

碳 C	锰 Mn	硫 S	磷 P	铝 Al	钛 Ti
≤0.006	≤0.25	≤0.02	≤0.02	≤0.015	≤0.2
抗拉强度	屈服强度	伸长率	塑性应变比 r	应变硬化指数	
$\sigma_b(\text{MPa})$	$\sigma_s(\text{MPa})$	$\delta(\%)$	(90°)	n(90°)	
300	150	43	2.5	0.23	

2.3.2 轿车后车门内板拉延工艺力的计算

拉延工艺是指在拉延加工过程中施加的各种作用力，其中拉深力的来源是压力机提供的作用力，对压边力的计算时，压边力的取值是一个非常重要的问题，压边力的数值要适合。

(1) 压边力

压边力太小，制件的防皱性较差；当压边力太大时，传力区危险截面处的拉应力将增加，使结构出现较大的减薄量，甚至出现拉裂现象。所以，在一个限度内，应该允许调整压边力的幅度，应在保证毛坯不起皱的前提下，尽量减小压边力。

模具设计时，压边力可按照其经验式（2-1）计算^[37]，

$$Q=Aq=601169.533 \times 2.5=1302.923\text{kN} \quad (2-1)$$

式中， Q —压边力(kN)；

A —有效压边面积(mm²)，

q —单位压边力(MPa)。

该数值是由经验公式得出的理论结果，在后续的拉延工艺仿真中，在确保产品质量的情况下，压边力采用 1300kN。

(2) 拉深力

对于圆筒形件、椭圆型件、盒形件，拉深力可用式 (2-2) 计算，

$$F_{拉} = Lt\sigma_b K_p = 4643.76 \times 0.7 \times 300 \times 0.8 = 780.15 \text{ kN} \quad (2-2)$$

式中， L —凸模周边长度（由 UG 建模测算出来），为 4643.76mm；

t —坯料厚度（mm）；

σ_b —材质自身的屈服强度（MPa）；

K_p —拉伸系数，取 0.8。

2.3.3 轿车后车门内板模具间隙的确定

拉延凹模与凸模间的间隙是影响拉延产品质量的关键因素。过大的间隙可能导致拉延件在成形后出现较大的回弹变形，进而影响零件的精度和稳定性。而间隙过小则可能使拉延件在成形过程中受到过大的压力，导致厚度分布不均，甚至发生断裂现象。因此，选择合适的模具间隙对于保证拉延产品质量和避免后续工艺问题至关重要。在实际生产中，应根据具体材料和工艺要求，合理调整模具间隙，以实现最佳的成形效果。

没有使用压边圈拉延时，模具间隙计算如式 (2-3)。

$$c = (0.8 \sim 1.2)t_{max} \quad (2-3)$$

有使用压边圈拉延时，模具间隙计算如式 (2-4)。

$$c = t_{max} + K_c t \quad (2-4)$$

式中， c —模具间隙（mm）；

t_{max} —材料最大的厚度（mm）；

t —板料基本厚度（mm）；

K_c —模具间隙系数，取 0.08~0.1。

所以 c 为 0.756~0.77mm，通常在实际生产中，拉延凸凹模需要通过数控修磨及磨削调试，才能找出适当的间距值，从而确保拉延产品的质量。

2.3.4 轿车后车门内板拉延模的行程

拉延工作的行程为从压边圈和凹模对板材施压开始到拉延过程结束，上模具在竖直方向上移动的距离^[38]。

(1) 拉延工作行程

从压边圈与模具一起挤压板材起至拉延结束为止，上模具在竖直方向上的移动距离。利用 UG 软件对毛坯向上运动直到工件底部的位置进行仿真，得出工件的长度为 5 或 10mm，然后在此基础上增加 10~15 毫米就可以得出工件的工作行程。

(2) 压边圈行程

当压料表面为曲面时，凹模开始与板材接触，到凹模与压边圈在一起，使上模具在竖直方向上移动为压边圈的行程。它的设计原理：高于模具最高点 10 毫米，最少 5 毫米。利用 UG 软件对工件顶点至压边圈的距离进行了测定，得出压边圈的行程 h 为 120mm。

2.4 轿车后车门内板拉延模具设计方案

在实现车门内板加工的过程中，最为关键的一个部分就是拉延工序，这部分是整个加工环节中的主要部分，对其实际的加工过程进行详细的分析，可以看到的是拉延模具是能够很好的将所需要加工的材料变成需要的工件的形状的，板料经拉延工序可塑造为各种形状的薄壁零件，获得零件特有的复杂表面特征。在成功塑造出零件的外形特征后，方可进行后续的冲孔修边等精细加工，以确保零件的整体质量和精度。拉延工序作为制造复杂形状零件的关键步骤，为后续操作奠定了坚实基础。

2.4.1 轿车后车门内板拉延模具

按其所用的冲压设备，可以划分为单动和双动压力机，这两种压力机倒装式拉延模的工作形式及装配方式都有很大的区别。结合工程实际应用场景及拉延模具的设计标准，本文的汽车后车门内板选用单动拉延模即可满足要求。拉延模核心组成部分：凸模、凹模、压边圈，另外还有平衡块、定位板组件、导板、安

全螺钉等标准件组件。

（1）拉伸模具材料

一般以零件生产规模及模具的寿命为依据,小批量生产采用 HT250 或 HT350 灰铸铁,中批量生产时应采用 QT500-7 或 QT600-3 的球墨铸铁,大批量生产时采用合金铸铁。

（2）拉伸模铸件结构

拉伸模的凸模、凹模、压边圈及定位座均为铸造成件,对其重量与强度、刚度均提出了较高的要求^[39]。所以在铸造时,不需要的部位都要做成中空的结构,在对强度、刚度有影响的地方要有拉伸筋。单动倒装式拉伸模的简图如图 2-9 所示,凹模往下行与制件接触到最后与凸模相互配合形成闭合,制件拉伸成功不需要第二次重复拉伸。

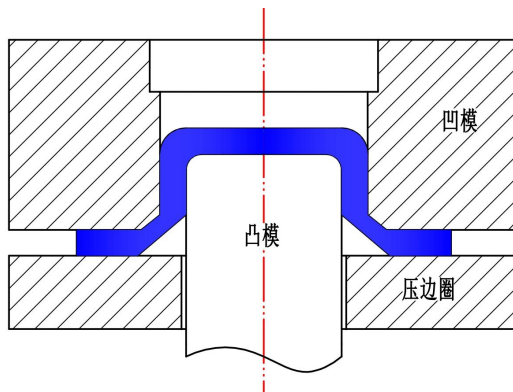


图 2-9 单动倒装式拉伸模

2.4.2 轿车后车门内板拉伸模的导向

因该模具总体尺寸大,凸模的型面形状复杂,在拉伸时会产生侧向力,故采用了角式背靠块导向,并设置在凹模的四个拐角。

（1）凹模与压边圈的导向

采用凸起部分与沟槽导向,其导向间隙通常为 0.3mm,以满足调整压边圈的给料阻力而使压边圈支撑面呈倾斜状态的要求^[40]。凸起部分设置在凹模上,在工作中能够清晰、安全地看到凸台,导向板设置在凸起部分和沟槽上面,如图 2-10 所示。

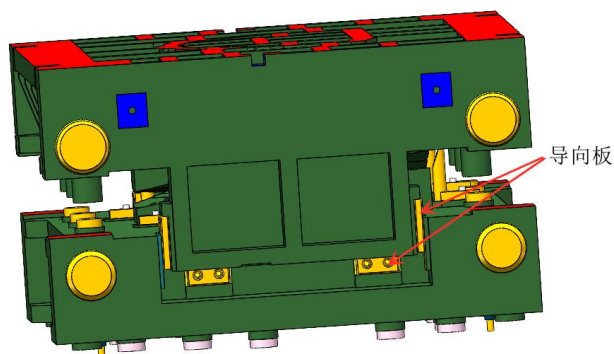


图 2-10 凹模与压边圈的导向示意图

(2) 压边圈与凸模的导向

根据模具的结构尺寸，因为顶杆行程选取了高度为 150mm 的导向板。凸模与压边圈之间需要设置导板^[41]，其安装方式为：在凸模的两边（窄面）上，装有 125×150×10 的导向板；在凸模的前面和后面（较宽的表面）上装有 125×150×10 的导向板，导向如图 2-11 所示：

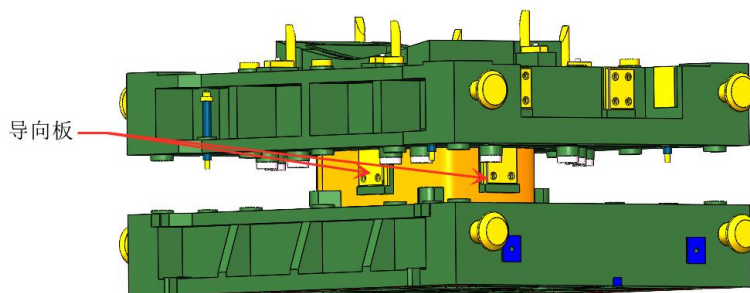


图 2-11 压边圈与凸模的导向示意图

2.4.3 轿车后车门内板拉伸模具设计

在轿车后车门内板拉伸模具设计中，凸凹模尺寸是非常重要的参数，模具的尺寸计算如式（2-5）和（2-6）。

$$D_d = (D_{max} - 0.75\Delta)_0^{+\delta_d} \quad (2-5)$$

$$D_p = (D_{max} - 0.75\Delta - 2c)_0^{+\delta_p} \quad (2-6)$$

式中， D_d —凹模的工作尺寸（mm）；

D_p —凸模的工作尺寸（mm）；

D_{max} —拉伸件最大外形尺寸（mm）；

Δ —拉伸件的公差（mm），一般取 0.1mm；

c —模具间隙 (mm) ;

δ_d —凹模的制造公差 (mm) , 取 0.09;

δ_p —凸模的制造公差 (mm) , 取 0.06^[42]。

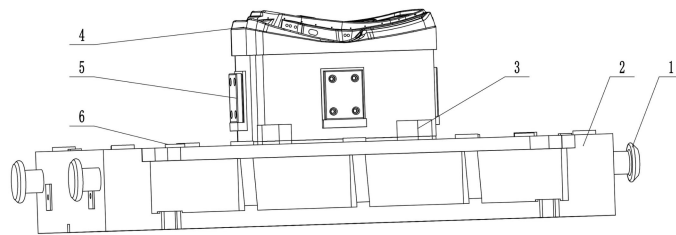
由式 (2-5) 和 (2-6) 求出轿车后车门内板拉伸模的设计尺寸, 如表 2-2。

表 2-2 模具计算尺寸表

零件尺寸 (mm)		分类	计算尺寸 (mm)
轴向 (mm)	1540	凸模轴向 (mm)	1438.363
		凹模轴向 (mm)	1539.975
径向 (mm)	1410	凸模径向 (mm)	1408.413
		凹模径向 (mm)	1409.875

2.4.4 下模的结构设计

轿车后车门内板的单动拉伸模的凸模结构与普通的拉伸冲模相似, 都是装在一个模板上面, 而模板则是通过与滑板或工作台相连接。因为车门的尺寸比较大, 因此凸模的尺寸也比较大, 并且还必须具有一定的耐冲击变形和耐损坏的能力, 还必须要降低自己的质量, 降低压力机的工作负荷, 因此在普通的工程中, 最好是用精密铸造的方法来制造凸模, 凸模的结构如图 2-12 所示。



1-吊耳 2-下模座 3-定位键 4-凸模模仁 5-下模导向板 6-平衡块

图 2-12 凸模的结构设计图

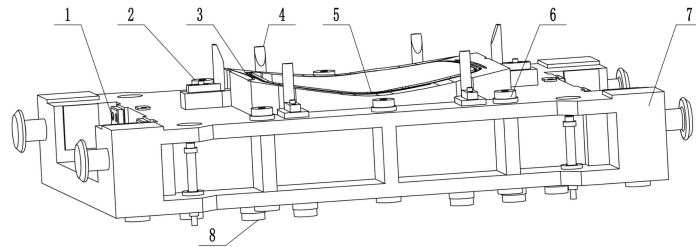
凸模设计需确保工作面与拉伸制件内部型面相符, 其尺寸较大, 故采用浇铸方法制成空心壳结构。同时, 在重要的部位加装加强筋以提高其强度和刚度。凸模的加强筋厚度通常控制在 40~50mm 范围内, 以满足使用要求。这些设计措施共同保证了凸模的准确性和整体性能。

为了节省材料, 下模采取了分离式设计, 下模为铸造结构, 凸模通过螺丝固定在下模底座上, 在四个角上设置了吊柱, 以对压边圈进行导向的功能, 另外凸

模安装面、定位槽、导板安装面等结构设计也要在下模底座上完成。

2.4.5 压边圈的结构设计

通常情况下，将压料面的尺寸从加工模型的毛坯线向外扩展 20mm，就能获得所需的有效压料面积。但是，在加工过程中，从拉伸中心到边缘的最小间距大于 40mm，最大间距也不能超过 100mm，压边圈的结构如图 2-12 所示。

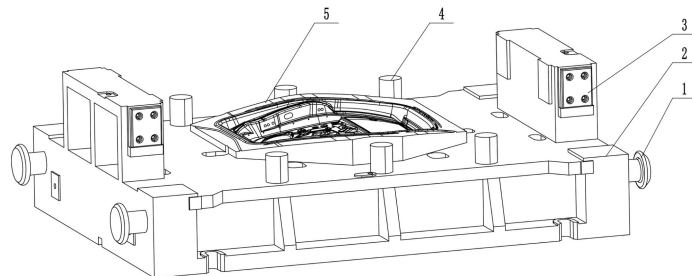


1-上模座导向板 2-限位螺杆 3-镶块 4-导向柱 5-下模座导向板 6-到底块 7-压边圈 8-顶杆
图 2-13 压边圈的结构设计图

压边圈设计需确保高度不小于 250mm，以维持足够强度，并与上下模具导滑面保持适当距离。同时，压边圈的长宽尺寸应综合考虑调整垫块、定位板、气垫顶杆等因素，并参考上模导向部件尺寸，确保合理设置，以满足模具运行要求，如图 2-13 所示。为节省成本，提高强度，改善模具外观，需适当降低压边圈的重量，形成一种配合坚固的框架结构。

2.4.6 凹模的结构设计

拉延凹模的构造是由凹模的压料面、拉延圆角以及内部的成形部件组成，通常分为封闭型和通口型两种^[43]。凹模为全铸造结构，如图 2-14 所示。



1-吊耳 2-上模座 3-上模座导向板 4-导柱 5-镶块

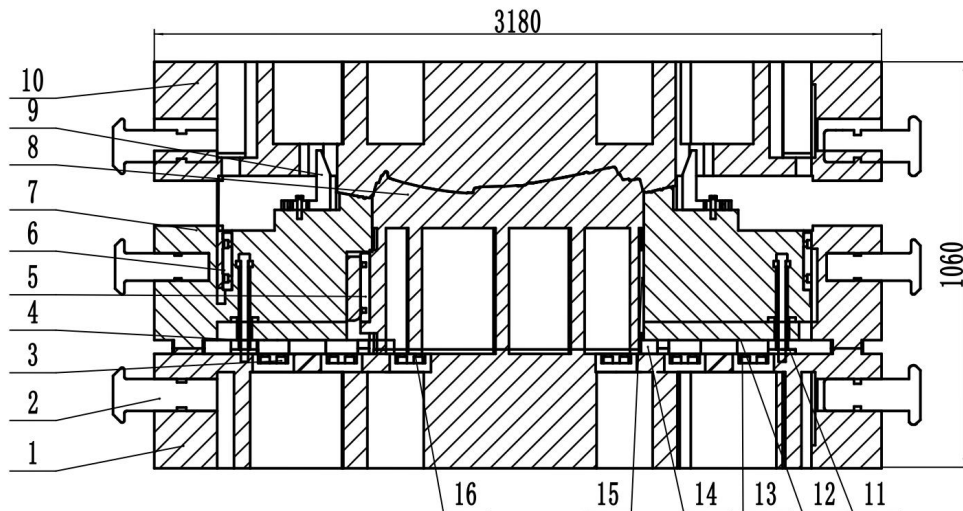
图 2-14 凹模的结构设计图

其设计原理为：确定凹模的结构尺寸，校正工作台面的最大封闭高度；压板槽位的定位是按压力机的尺寸来决定的。另外在凹模的两端还设计了凸台，凸台

上安装了导板，为了与压边圈的凹槽上的导板相配合起到导向的作用。

2.4.7 轿车后车门内板拉延模装配图

利用 UG 软件设计拉延模具的整体结构，主要是凸模、凹模和压边圈三个部分。如图 2-15 是轿车后车门内板拉延模具二维图，图 2-16 轿车后车门内板拉延模具三维图，其中 1060mm 为模具闭合高度。



- 1-下模座 2-起吊 3-平衡块 4-限位螺钉 5-导板 6-导板
7-压边圈 8-凸模 9-定位件 10-凹模 11-限位螺杆
12-平衡块 13-顶杆 14-限位块 15-镶块 16-到底块

图 2-15 轿车后车门内板拉延模具二维图

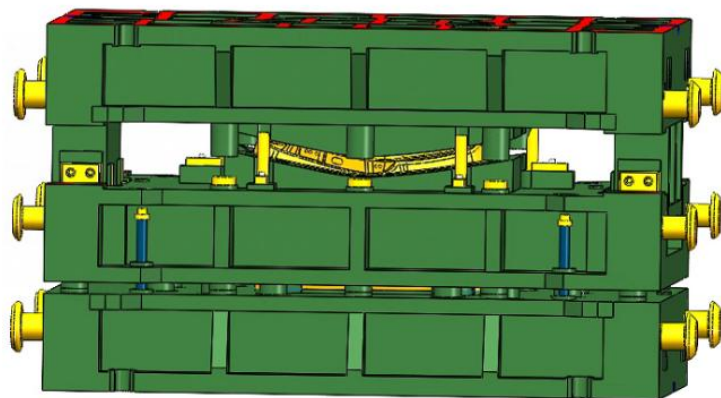


图 2-16 轿车后车门内板拉延模具三维图

凸模模仁通过螺钉安装于下模座上，凹模通过螺钉安装于上模座上压边圈也同样采用螺钉进行安装，模具设计尺寸为：长×宽×高=3180mm×2300mm×

1060mm。

凸模与压边圈之间的导向装置是在凸模前后左右分别安装导板，压边圈通过导板和凸模进行相互配合，压边圈与凹模之间的导向是在凹模的凸台和压边圈的沟槽上设置导板，使压边圈与凹模相互配合。

在工作过程时，毛坯放在压边圈上，启动单动压力机，上模座向下运动，当上模座接触压边圈后，板料被凹模压在压边圈上，一直向下运动，毛坯被凸模拉入凹模中，拉延成形结束后，上模座向上运动，压边圈通过顶杆获得所需的压料力，顶杆在弹簧的支撑下，制件利用压边圈从凸模上面顶出。

2.5 本章小结

本章主要基于 CATIA 软件设计了轿车后车门内板的零件结构，拟定了轿车后车门内板的冲压工艺路线，确定了拉延过程中板料的主要参数及工艺的简单计算过程，利用 UG 软件设计了轿车后车门内板拉延模具的整体结构。

(1) 基于 CATIA 软件设计轿车后车门内板的三维数据模型，分析了其基本尺寸，其基本尺寸参数为：长 1280mm、宽 1108mm、零件上下面最大高度差 200mm。零件的形状不规则，内部曲面较为复杂。

(2) 拟定了轿车后车门内板的冲压工艺路线，其工序有拉延，修边+侧修边，修边+冲孔，整形+侧修边+翻边+侧冲孔+冲孔，冲孔+侧冲孔+修边，最终得到轿车后车门内板零件。

(3) 确定了拉延过程中主要的参数，设置了板料毛坯尺寸为：最大宽度 1540mm，最小宽度 1410mm，板料的厚度为 0.7mm，本文将选取 DC07 低碳钢作为轿车后车门内板的板料毛坯材料，及其一些主要参数的确定。

(4) 利用 UG 软件设计拉延模具的整体结构，主要是凸模、凹模和压边圈三个部分。凸模与压边圈之间的导向装置是在凸模前后左右分别安装导板，压边圈与凹模之间的导向是在凹模的凸台和压边圈的沟槽上设置导板。凸模的工作面与需要拉延的制件的内部型面是一致的，压边圈需要确保与上、下模具之间的导滑面有一定的距离，拉延凹模的构造是由凹模的压料面、拉延圆角以及内部的成形部件组成，通常分为封闭型和通口型两种。

第3章 基于 Autoform 的轿车后车门内板拉延成形仿真模拟

实际的生产加工中工厂员工往往通过自己的生产经验来判断零件成形质量的好坏，这样不仅不准确还容易浪费时间和成本。本文通过 AutoForm 仿真模拟轿车后车门内板拉延过程，利用 CAE 分析技术清晰了解到有无拉延筋情况下，零件的最大减薄率和最大起皱率的情况。

3.1 AutoForm 软件分析思想

AutoForm 软件对 CAD 模型的解析如图 3-1 所示，主要是通过 UG 等软件把 CAD 模型输入进去，再设置一系列的工艺参数，对模型进行拉延筋的设置再求解等等，如果不满意分析结果，可以对模型进行修改再次分析，也可以修改工艺参数使达到自己想要的结果。

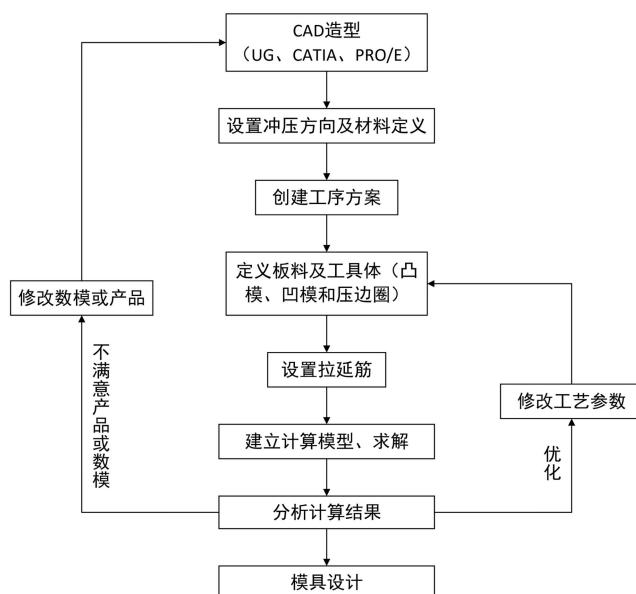


图 3-1 AutoForm 软件分析 CAD 模型步骤图

AutoForm 数据导入可通过两种方式实现：一是直接自 AutoForm 导入，生成压料面以支持模拟；二是利用 AutoForm 的 CAD 接口，先将数据转化为 CAD 绘图后再导入。这两种方式均支持 IGS 等共享格式文件。用户可根据实际需求选择合适的导入方式^[44]，虽然 Autoform 可以对 IGES、VDA 及 CATIA 等数据的对接，但是为了防止导入的数模发生损坏，一般用 IGS 文件格式，这样有利于后续的工序的进行。

3.2 轿车后车门内板拉延预成形仿真模拟

在汽车覆盖件拉延过程中常出现开裂、起皱等缺陷，所以对于轿车后车门内板这类汽车覆盖件来说，通过软件仿真模拟进行拉延工艺设计，对各种成形缺陷进行预测就显得十分重要。

3.2.1 零件的导入

Autoform 可以直接导入零件，也可以导入工具体。最主要的差别，工具体无法被修改，零件的可以在 Autoform 中再次加工得到一些延伸曲面的，在定义工具面时，工具体和零件的面没有差别，都可以使用。（对于显示红色是因为在使用零件定义时需要操作多个步骤完成定义，没有操作完成所以显示红色，而工具体是无法被修改当你定义完成，也就完成操作了）。而本文选择导入工具体，其实工具体为预先做好的轿车后车门内板零件片体。采用 IGS 格式对轿车后车门内板零件进行了片体模型的转化，并将其输入到 Autoform 软件中，如图 3-2 所示。

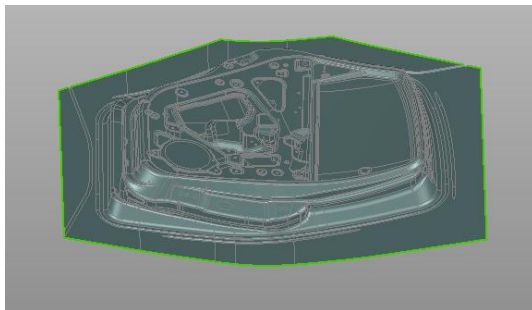


图 3-2 轿车后车门内板导入 Autoform 软件中

3.2.2 冲压方向的确定

在零件的导入之后，首先要明确拉延方向，在拉延过程的数值模拟中，冲压方向是首要步骤，所有后续过程都必须在同一方向上进行，因此，如何选择合适的冲压过程就显得尤为重要。冲压方向的选择是否合理，将直接影响整个板料成形的过程难易程度，不仅对冲出理想的拉延件有影响，还会对后续的工序的工艺设计和模具设计直接挂钩。合理的拉延方向需要满足一次就能够把拉延工件的所有空间形状拉延出，不能够有凸模接触不到的地方，最大限度减小拉延深度差，

减少材料流动和变形的不均匀性^[45]，确保凸模和毛坯之间的良好的接触。

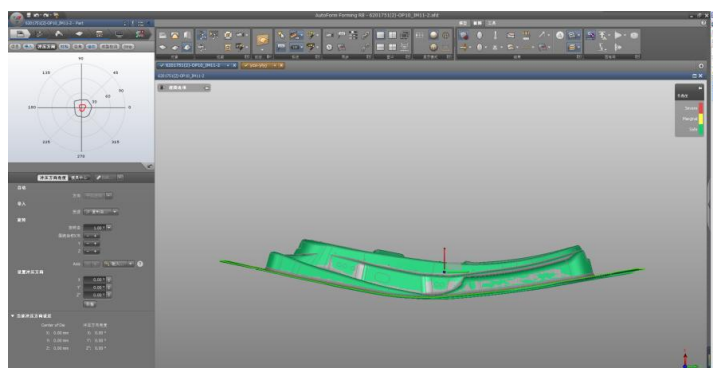


图 3-3 冲压方向的确定

在 Autoform 自动设置冲压方向的基础上，进行了手动调整，确保凹模与凸模高度配合，实现顺利闭合。在冲压过程中，板料首先放置在凸模上，凸模与毛坯中间部分首先接触。随着板料下行，周边位置逐渐与凸模接触，材料得以流动并顺利成形。这种手动调整的方法有助于防止成形缺陷的产生，确保冲压过程的顺利进行。可以将 Z 轴作为冲压方向，通过调整，使轿车后车门内板零件不存在冲压负角，如图 3-3 所示，可判定轿车后车门内板零件无负角，皆为绿色区域，所有位置都安全。

3.2.3 材料设置

车门内板选用的板料毛坯材料是宝钢冷轧钢，牌号为 DC07，在 Autoform 的材料库中，选取了相应的 DC07 材质，并对其进行了分析。材料的屈服强度、屈服比、断后伸长率以及断面收缩率是决定拉伸成形质量的关键因素。

3.2.4 拉伸设置

汽车后车门内板拉伸选用单动拉伸，在 Autoform 中选择单动拉伸模块即可如图 3-4 所示。单动拉伸一般采用倒装拉伸，这种方式的凸模结构以及压边圈的结构是处于下方的位置上的，而且凹模是处于上方的位置上的，顶出缸的位置存在有压边圈的机构，采用的压力机的类型是属于单动压力机的类型的，这种设备在正常使用的时候，是需要确保顶出过程中的压力能够满足加工过程中的需求的时候才能够使用的。单动拉伸技术具有模具结构简单、加工容易、成本低等优势，但其拉深深度有限，压边力控制困难，且复杂零件成形难度大^[46]。

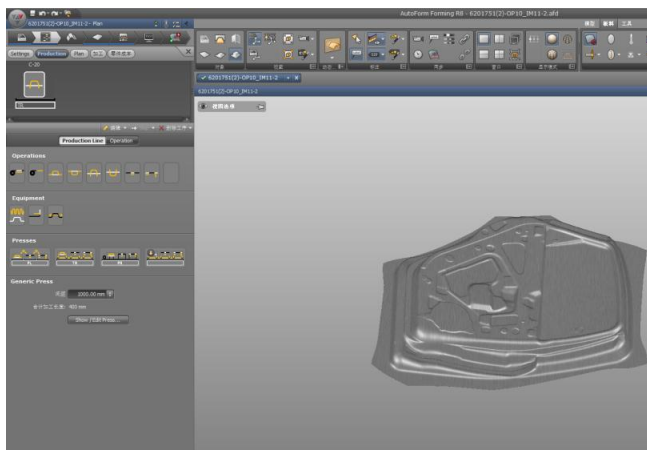


图 3-4 拉伸工序的选择

3.2.5 工具体设置

根据车门内板零件片体，系统自动生成了拉伸模具的凸凹模及压边圈。在此基础上，重新定义了各工具体位置及冲压过程，以确保精确成形。预成形压边力设为 1300kN，以保证冲压过程中的稳定性。采用单动拉伸方式，Ram 部分包括凹模，Bed 部分则涵盖凸模和压边圈。随后，根据设计需求选择模面，并成功生成工具体^[47]。如图 3-5 所示，凹模在上面，当凹模下行时接触板料后一起继续下行；板料在压边圈上方，随之进入拉伸过程，在下冲时，板材与凸模始终保持着一定的接触，通过这三个因素的共同作用，最终实现了板材的成形。

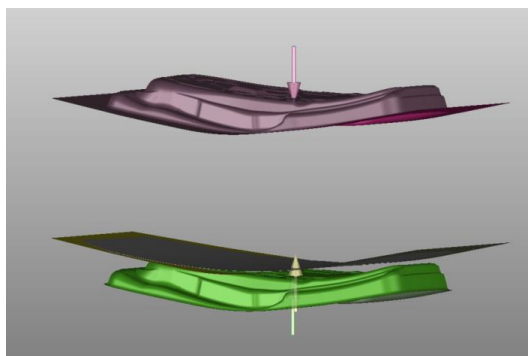


图 3-5 轿车后车门内板拉伸工具体

3.2.6 轿车后车门内板预成形仿真结果分析

在所有的步骤完成操作后，在板料与工具单元选择默认参数，在工具体下的 binder 里面的压边力修改为 1300kN。在板料拉伸成形工序中，压边力是一个非常关键的因素，它直接关系到冲压件的质量，其余参数选择默认值即可^[48]。

借助 AutoForm 来分析零件拉延成形结果时,可以根据其成形的极限图 FLD,如图为轿车后车门内板初次仿真模拟 FLD 图^[49]。从打开的成形极限图中,可以看到板材成形的效果。右上角的色条显示了拉裂起皱的趋势,在这里红色的区域是拉裂的,黄色的区域是拉裂危险,绿色的区域是安全的,蓝色的是有起皱的趋势,起皱的是粉红色的,严重起皱是紫色的区域,灰色区域是没有被充分拉伸的。车门为大型车身覆盖件,其体积大、结构复杂,其内部零件众多,其冲压尺寸大而不均,为获得满意的结果,往往要经过多次调试和反复仿真。

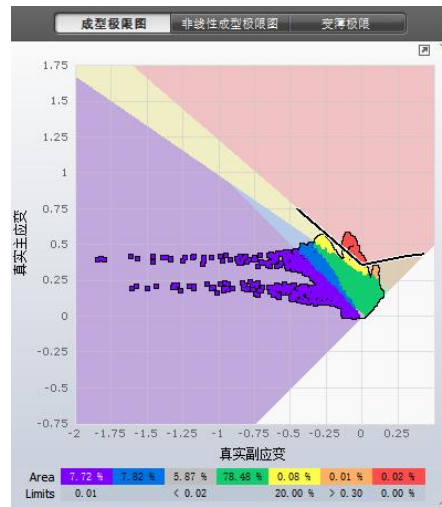
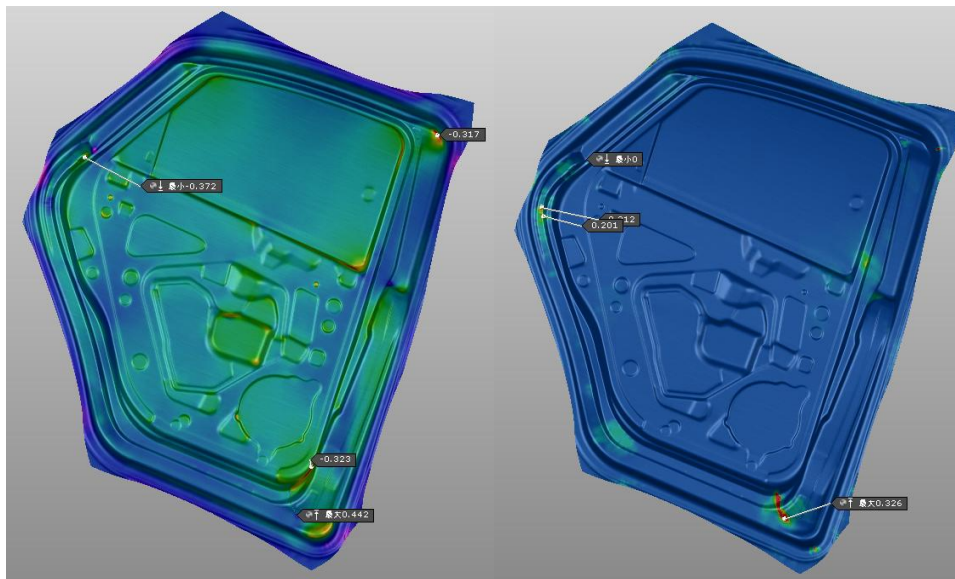


图 3-6 轿车后车门内板预成形 FLD 图

图 3-6 中显示,轿车后车门内板有严重的起皱现象,即紫色区域,并且有拉裂和拉裂趋势区域,即红色和黄色区域。



(a) 最大减薄率云图

(b) 最大起皱率云图

图 3-7 轿车后车门内板预成形仿真模拟图

图 3-7 (a) 表明零件的轻拉裂和具有拉裂趋势的区域, 分布于车门的棱角、边框等微小的地方, 图 3-7 (b) 中比较大面积的起皱区域, 几乎全部位于车门周围的边框部分, 在轿车后车门内板底部法兰边部位有一大片区域的起皱现象。如图 3-7, 轿车后车门内板零件在初次仿真模拟中, 其最大减薄率达到 37.2%, 最大起皱率为 32.6%, 成形结果并不理想, 存在明显的成形缺陷。特别在零件的棱角处, 出现了较大的缺失。分析其原因, 主要是在拉延成形过程中, 板料的四周棱角和边框凸起部位首先与凸模接触, 因此受到的径向应力较大。此外, 由于板料在缺乏拉延筋的情况下, 其运动阻力较小, 导致部分区域材料流动不充分, 进而造成局部缺失。

3.3 设置拉延筋后的轿车后车门内板的成形仿真模拟

拉延筋是覆盖件成形过程中的关键环节, 其成形过程中, 毛坯需要一定大小且沿周边适当分布的作用力^[50], 其作用力主要来源于冲压装备的受力与压料面的受力, 因此, 在压料面施加较大的阻力以保证毛坯的塑性变形与塑性流动, 并实现对毛坯的变形大小及变形分布的有效调控^[51]。

3.3.1 拉延筋的作用

拉延筋的效果: 增加了进料阻力, 使得毛坯发生大的塑性变形, 从而增加了冲压件的刚性; 调整进料阻力的分布及大小, 控制压料表面各部分物料流入模具的速率及进给量; 减小对压料表面的需求, 减小对压边力的需求^[52]。

结合 3.2 节和拉延筋的作用分析, 决定在压边圈上设置拉延筋, 通过增大进料阻力, 改变轿车后车门内板四周棱角拉延不足及零件起皱的现象。根据轿车后车门内板零件的结构特点及拉延筋的作用, 设计四段系数不同的拉延筋, 阻力系数分别为 0.5, 0.15, 0.5, 0.15, 如图 3-8 所示。

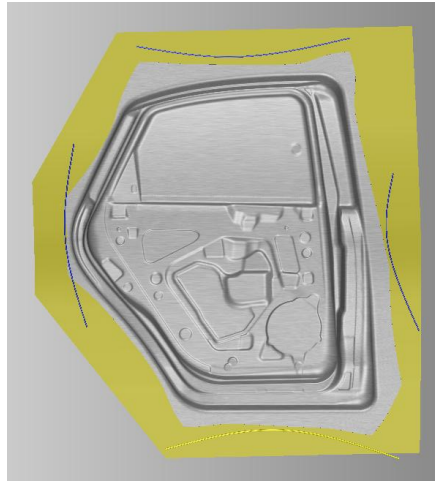


图 3-8 拉延筋设置简图

将拉延筋的中心线导入 Autoform 中，设置压边力为 1300kN，其他参数均采用 Autoform 软件中的默认值，将进入设置拉延筋后的轿车后车门拉延成形仿真模拟。

3.3.2 设置拉延筋后的仿真模拟

在进行仿真模拟后得到如图 3-9 的 FLD 图，从图中可以看出，与不设置拉延筋相比，轿车后车门内板的成形效果明显提高，在成形区域分析图中，绿色部分表示理想的成形效果，而黄色、橙色和红色通常用来警示过度变薄乃至开裂的风险。然而，在本例中，并未出现这些风险区域。相反，图中较多地显示了灰色、蓝色和紫色区域，这些颜色代表材料拉伸不足，存在起皱的可能性。更为关键的是，这些拉伸不充分的区域恰好位于零件成形区，增加了叠料的风险。

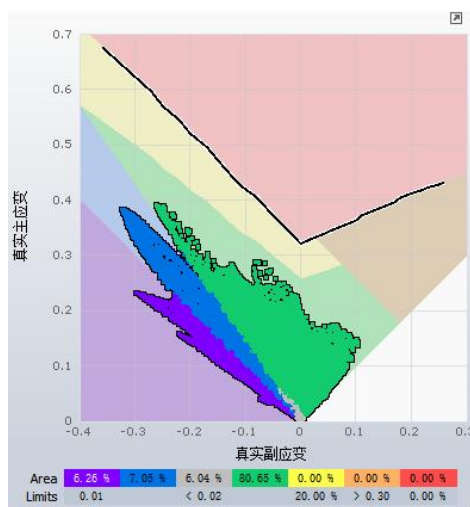
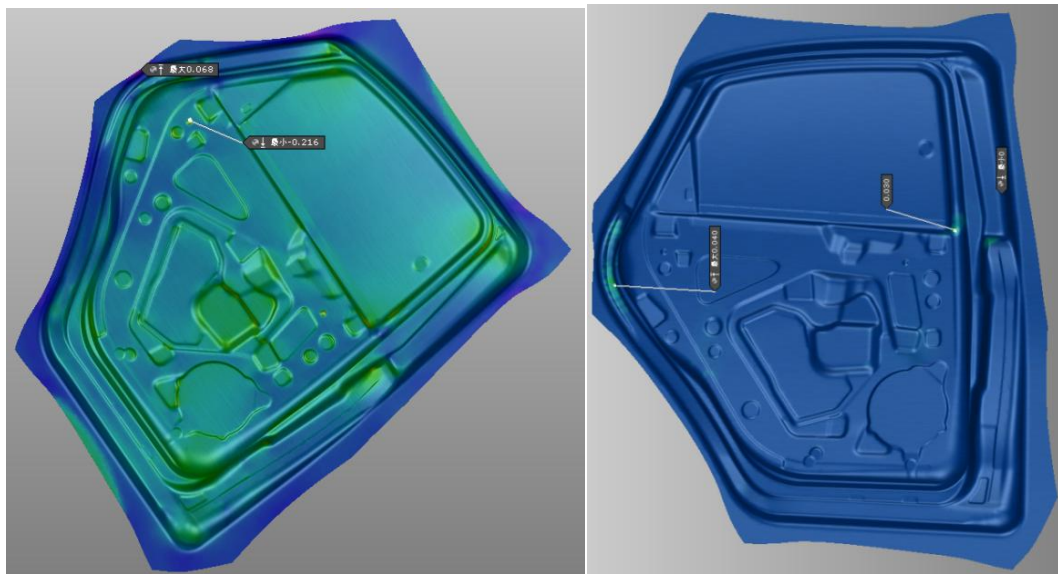


图 3-9 设置拉延筋后轿车后车门内板成形 FLD 图

图 3-9 中表明在设置拉延筋之后，拉延结果有了明显改善，轿车后车门内板的拉延成形的模拟仿真效果得到明显的提高，与不设置拉延筋相比，零件成形的缺陷得到了改善，此时零件成形的开裂缺陷已经得到了解决，最大减薄率云图 3-10 (a) 显示最大减薄率只有 21.6%。但是对于最大起皱率仍然比较大，最大起皱率云图 3-10 (b) 显示最大起皱率为 4.0%，零件的法兰和侧壁及车窗部位是起皱的主要区域，可能是由于板料侧壁材料流入量较少，导致零件侧壁及边框部分出现材料堆积，在边缘出现叠料风险。



(a) 最大减薄率云图

(b) 最大起皱率云图

图 3-10 设置拉延筋后轿车后车门内板仿真模拟图

在实际工厂生产加工中，除了一些特别的地方需要特殊的要求以外，其它地方一般将最大减薄率控制在 30%以下，最大起皱率在 3%以下，所以还需要进一步改变工艺参数组合，尽量得到最优的一组最优工艺参数，提高轿车后车门内板零件的成形质量。

3.4 本章小结

本章利用 Autoform 软件对轿车后车门拉延过程进行仿真模拟，分别得到了在无拉延筋和有拉延筋的情况下，零件的最大减薄率和最大起皱率的情况。

(1) 简述了 Autoform 软件可以分析板料成形的流程，AutoForm 数据的导入主要的两种方式，直接从 AutoForm 进行导入和利用 AutoForm 的 CAD 接口。

(2) 把零件导入到 Autoform 软件中进行预成形的仿真模拟，得到了轿车后

车门内板零件的最大减薄率为 37.2%，最大起皱率为 32.6%，初次仿真模拟成形出来的结果非常不好，成形缺陷较为明显，其零件的棱角处有较大缺失。

（3）根据轿车后车门内板零件的结构特点及拉延筋的作用，设计四段系数不同的拉延筋，阻力系数分别为 0.5，0.15，0.5，0.15，再次导入软件进行仿真模拟，得到最大减薄率只有 21.6%，最大起皱率为 4.0%，还需要进一步工艺参数优化，为后续优化奠定基础。

第 4 章 轿车后车门内板成形工艺参数优化

基于第三章利用仿真软件对零件拉延过程进行仿真模拟,得到了成形质量最大减薄率和最大起皱率并不是很理想,成形效果没有达到要求,本章选择了压边力、模具间隙、摩擦系数为试验因素,构建了最大减薄速率与最大起皱率的响应面模型,建立以试验因素为自变量的优化模型,对此模型进行优化求解,最终得到最优工艺参数组合,零件成形效果良好。

4.1 响应面法简介

响应面法是一种通过合理试验设计,以响应面函数为基础,对工艺参数和目标函数进行拟合,以求出最优的工艺参数,并以此为基础进行工艺参数优化,所以,响应面方法被广泛地用于板材冲压工艺参数的优化^[53]。

4.1.1 试验设计

响应面设计方法是通过良好的试验设计获取试验数据,在响应面方法中,中心复合试验(CCD)和 BBD 试验设计(BBD)是目前应用最多的试验方法,其最大的不同之处在于,在相同条件下,BBD 试验的数量较少,且精度较高^[54]。Box-Behnken 设计假设试验区间^[55]中含有二次函数,并将试验点选择在编码立方体每个棱线的中间点如图 4-1 所示,选择了 BBD 试验设计作为试验设计方案。

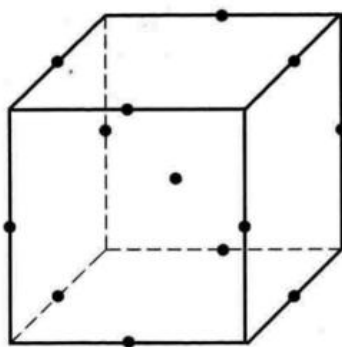


图 4-1 Box-Behnken 设计试验空间边缘中点处的处理组合图

在 BBD 试验设计中,选择 3~5 个常规因子,每因子 3 个水平,然后以中间点为依据来安排试验的次数。

4.1.2 响应面模型的建立

由于轿车后车门内板的成形过程非常复杂，工艺参数对其成形质量存在非线性影响，因此，采用广泛应用的二次多项式构造响应面模型，一般的二阶响应面函数为式（4-1）。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (4-1)$$

式中， β_0 —常数；

β_i —线性系数；

β_{ii} —平方项的系数；

β_{ij} —交互项的系数；

x_i 和 x_j —自变量；

y —因变量。

通过式（4-1）多项式模型，可以对大多数优化问题进行合理的逼近，再用近似拟合的方法进行响应面分析，从而最大限度地评估各参数对系统响应量的影响。

4.1.3 精度检验

决定系数 R^2 和修正决定系数 R^2_{adj} 的值范围为 (0, 1)，两者值越接近于 1 且差值不超过 0.2，则表示响应面模型精确，能得到的预测结果也就更准确^[56]。

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4-2)$$

SST 、 SSR 和 SSE 可以通过下方表达式计算：

$$SST = \sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y})^2 \quad (4-3)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^p (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (4-4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^p (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (4-5)$$

式中， p —试验组数；

y_i —实际试验得到的响应值；

$\tilde{y}_i$ —响应面模型计算的响应值；

$\bar{y}_i$ —实际试验的响应值均值。

因为 R^2 会受到试验因素的多少的影响，所以用修正决定系数 R^2_{adj} 对比不同试验因素多少对响应面模型拟合精确度的影响程度。

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{p-1}{p-k-1}(1 - R^2) \quad (4-6)$$

式中， p —样本点数目；

K —模型自由度。

结合式（4-2）、（4-3）、（4-4）、（4-5）和（4-6）可得 R^2 和 R^2_{adj} 表达式如（4-7）和（4-8）。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4-7)$$

$$R^2_{adj} = \frac{\sum_{i=1}^p (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 (p-1)}{\sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y}_i)^2 (p-k-1)} \quad (4-8)$$

4.2 轿车后车门内板成形工艺参数优化

轿车后车门内板的成形工艺参数优化是为了在生产过程中获得高质量的内板，并确保生产效率。在拉延过程中有许多工艺参数会影响零件的成形质量，选取对成形质量影响比较大的工艺参数作为试验因素，可以评价零件成形质量的指标作为轿车后车门内板成形质量的评价指标。

4.2.1 试验因素

一般来说，在选择试验影响因素时，应优先考虑哪些试验要素对试验评估指标的影响比较大，哪些试验要素的变化规律不完善，哪些试验要素未被检验过。在此基础上，针对轿车后车门内板拉延成形过程中，影响最大减薄率和最大起皱率的因素较多，依据拉延成形及影响因素等相关理论知识，结合工厂实际生产等因素，提出三种主要影响因素，即影响拉延成形的工艺参数。

（1）压边力对轿车后车门内板拉延成形质量的影响

在汽车覆盖件拉延加工中，压边力是一个非常关键的工艺参数，合理的压边力可以保证零件的均匀、平稳的流动，有效抑制零件失稳趋势^[57]。压边力是一种用来防止毛坯发生起皱和确保拉延工艺平稳进行的作用力，其数值对拉延工序有

重要的影响。压边力过小时，不能增大板料径向拉应力，导致材料流动不足，在板料侧壁及边框容易出现起皱的现象。压边力比较大时，板料的径向拉应力变大，可增大危险部位的拉应力，导致拉裂失效或严重减薄。此外，压边力的大小还对模具的磨损有直接影响，与模具的寿命有联系。

（2）凸凹模具间隙对轿车后车门内板拉延成形质量的影响

拉深模的凸凹模间隙直接关系到拉深力、拉深件质量和模具使用寿命。在较小的间隙下，拉深力较大，对模具的损耗也较大，虽然拉深件的回弹较小，且具有较高的精度，但拉深件壁面严重减薄，甚至出现裂纹，严重影响拉延件的成形质量。间隙过大时，拉深时坯料受力不均匀，板料成形质量降低，局部地方容易产生叠料或起皱的缺陷，另外，由于拉延过程中口部增厚现象无法消除，导致拉深后工件锥度大，影响加工精度^[58]。所以，在拉延过程中，凹凸模间隙的设定要合理，不仅可以提高零冲压成形的质量，还可以提高模具的寿命。

（3）摩擦系数对轿车后车门内板拉延成形质量的影响

摩擦系数不仅决定了成形力的大小，而且还决定了板材的成形性能。在冲压时，若摩擦系数太大，那么坯料的流动就会受阻，从而导致板料向内部延伸的过程受到阻碍，此时板料的圆角处容易出现拉裂的现象^[59]。除此之外，当凹凸模与毛坯间的摩擦系数太大时，模具的磨损将增大，从而缩短冲模寿命。

4.2.2 评价指标的确定

若拉延件在拉延模制作完毕后，在调试时发生裂纹、起皱等情况，需认真分析研究，并加以处理。这里主要通过 BBD 试验设计方法改变轿车后车门内板冲压成形工艺参数来优化零件成形的质量。在实际拉延成形过程中，轿车后车门外板拉延成形的最大减薄率不能超过 28%，起皱率不能超过 3%，所以在此本节选择最大减薄率和最大起皱率作为 BBD 试验设计的评价指标。

4.3 BBD 试验设计及结果

通过以上分析 BBD 试验将以模具间隙 A，摩擦系数 B，压边力 C 为试验因素，以拉延工序的最大减薄率 X、最大起皱率 Y 为目标函数。利用 Design Expert 进行 Box-Behnken 试验，试验为三因素三水平，根据 BBD 试验因素数与次数之

间的关系，通过表 4-1 得到共进行 17 次试验，表 4-2 为通过 Autoform 仿真模拟得到的数据。

表 4-1 试验因素的水平上下边界值

试验因素	下边界	上边界
A 模具间隙 x_1 (mm)	0.56	0.84
B 摩擦系数 x_2	0.13	0.17
C 压边力 x_3 (kN)	1250	1450

表 4-2 BBD 试验模拟仿真结果

序号	A 模具间隙 x_1 (mm)	B 摩擦系数 x_2	C 压边力 x_3 (kN)	X 最大减薄率 (%)	Y 最大起皱率 (%)
1	0.56	0.17	1350	25.2	2.9
2	0.7	0.17	1250	23.2	3.2
3	0.84	0.17	1350	24.2	2.8
4	0.7	0.15	1350	21.7	3.8
5	0.7	0.15	1350	21.7	3.8
6	0.56	0.15	1450	22.5	3.4
7	0.84	0.15	1250	21.1	3.8
8	0.7	0.15	1350	21.7	3.8
9	0.56	0.13	1350	21.6	4.5
10	0.7	0.13	1450	21.1	4.6
11	0.84	0.13	1350	21	4.9
12	0.7	0.13	1250	21.1	4.9
13	0.56	0.15	1250	21.2	3.7
14	0.7	0.15	1350	21.7	3.8
15	0.7	0.15	1350	21.7	3.8
16	0.7	0.17	1450	27.3	2.5
17	0.84	0.15	1450	22	3.1

4.4 响应面模型建立

由于轿车的后车门内板的冲压成形过程非常复杂,工艺参数与成形质量之间存在非线性的关系,不能清楚的表达,所以根据表 4-3 的最大减薄率和起皱率两个成形质量指标,借助 Design-Expert 响应面分析的功能,建立关于最大减薄率和起皱率二次多项式(4-9)和(4-10)的响应面数学模型。

最大减薄率:

$$X = 21.7 - 0.275x_1 + 1.89x_2 + 0.7875x_3 - 0.1x_1x_2 - 0.1x_1x_3 + 1.03x_2x_3 - 0.0875x_1^2 + 1.39x_2^2 + 0.0875x_3^2 \quad (4-9)$$

最大起皱率:

$$Y = 3.80 + 0.0125x_1 - 0.9375x_2 - 0.25x_3 - 0.125x_1x_2 - 0.1x_1x_3 - 0.1x_2x_3 - 0.1625x_1^2 + 0.1375x_2^2 - 0.129x_3^2 \quad (4-10)$$

F 值是用来判断回归方程整体是否显著^[60],可以构造 F 统计量:

$$F(p, p - k - 1) = \frac{SSR/p}{SSE/(p-k-1)} \quad (4-11)$$

式(4-11)的构造来看, F 统计量用于评估模型显著程度,其值越大表明模型越显著,能有效描述影响因素与响应目标间的关系;反之,若 F 统计量接近零,则模型不显著,难以准确刻画变量间的联系^[61]。根据表 4-2 的试验结果进行方差分析得到表 4-3 和表 4-4。

表 4-3 最大减薄率响应面模型进行方差分析

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	893.60	9	99.29	30.62	<0.0001	significant
A-模具间隙 x_1	19.85	1	19.85	6.12	0.0426	
B-摩擦系数 x_2	432.18	1	432.18	133.28	<0.0001	
C-压边力 x_3	278.48	1	278.48	85.88	<0.0001	
x_1x_2	0.2025	1	0.2025	0.0625	0.8098	
x_1x_3	46.92	1	46.92	14.47	0.0067	
x_2x_3	0.0625	1	0.0625	0.0193	0.8935	
x_1^2	4.89	1	4.89	1.51	0.2592	
x_2^2	14.84	1	14.84	4.58	0.0697	

x_3^2	88.23	1	88.23	27.21	0.0012	
Residual	22.70	7	3.24			
Lack of Fit	10.83	3	3.61	1.22	<0.0001	not significant
Pure Error	11.87	4	2.97			
Cor Total	916.30	16				

通过对最大减薄率响应面模型进行方差分析，得到的 $F=30.62$ ， P 值 <0.001 ，因此，响应面模型对最大减薄率的影响极其显著。该模型的失拟合（Lack of Fit）系数（ $P<0.0001$ ）低于 0.0001，表明该模型能很好地拟合最大减薄率，并具有很小的误差，可以用于最大减薄率的分析与预测。根据三个变量的 F 值的大小，可以得出三个变量对最大减薄率的影响程度，即摩擦系数>压边力>模具间隙。

表 4-4 最大起皱率响应面模型进行方差分析

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	12.20	9	1.36	27.47	<0.0001	significant
A-模具间隙 x_1	0.2812	1	0.2812	5.70	0.0484	
B-摩擦系数 x_2	5.78	1	5.78	117.11	<0.0001	
C-压边力 x_3	3.78	1	3.78	76.61	<0.0001	
x_1x_2	0.0025	1	0.0025	0.0507	0.8284	
x_1x_3	0.6400	1	0.6400	12.97	0.0087	
x_2x_3	0.0025	1	0.0025	0.0507	0.8284	
x_1^2	0.0509	1	0.0509	1.03	0.3435	
x_2^2	0.2325	1	0.2325	4.71	0.0666	
x_3^2	1.32	1	1.32	26.75	0.0013	
Residual	0.3455	7	0.0494			
Lack of Fit	0.1775	3	0.0592	1.41	<0.0001	not significant
Pure Error	0.1680	4	0.0420			
Cor Total	12.55	16				

通过对最大起皱率响应面模型进行方差分析，得到的 $F=27.47$ ， P 值 <0.001 ，

因此，响应面模型对最大起皱率的影响极其显著。该模型的失拟合（Lack of Fit）系数（ $P < 0.0001$ ）低于 0.0001，表明该模型能很好地拟合最大起皱率，并具有很小的误差，可以用于最大起皱率的分析与预测。根据三个变量的 F 值的大小，可以得出三个变量对最大起皱率的影响程度，即摩擦系数 > 压边力 > 模具间隙。

4.5 响应面模型精度检验

为了保证其能良好的代替真实模型，在建立了二阶响应面之后，需要对其进行精度检验。

（1）理论检验

利用 Design Expert 软件分析得到样本决定系数 R^2 和 R_{adj}^2 ，校正决定系数用来评价模型的精度是否满足条件，它们的大小越接近 1，则代表响应面模型越精确。

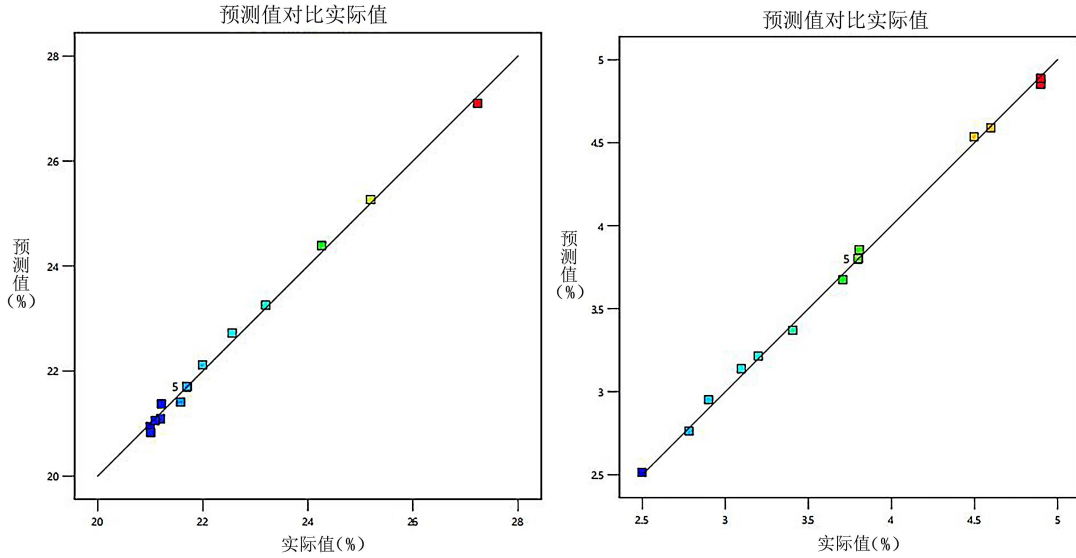
表 4-5 校正决定系数

模型	R^2	R_{adj}^2	R_{pred}^2
最大减薄率响应模型	0.9752	0.9434	0.7907
最大起皱响应模型	0.9725	0.9371	0.7528

通过表 4-5 可知最大减薄率响应模型的 R^2 是 0.9752， R_{adj}^2 是 0.9434，最大起皱率响应模型的 R^2 是 0.9725， R_{adj}^2 是 0.9371， R^2 和 R_{adj}^2 的数值愈趋近于 1，说明该模型的准确性较高，可信度较高， R_{pred}^2 分别是 0.7907 和 0.7528，与 R_{adj}^2 相差均小于 0.2，所以模型可靠性很高，不需要再优化。结果表明，建立的响应面模型可以代替有限元模型，对零件的最大减薄率及最大起皱率进行了预测与分析。

（2）适应度图检验

图 4-2 是两个响应面模型的适合度曲线图，如果模型建立得很好，那么预测结果与真实数据之间的关系就会愈接近于同一直线。



(a) 最大减薄率响应面适合度曲线图 (b) 最大起皱率适合度曲线图

图 4-2 评价指标响应面模型的适合度曲线图

图 4-2 (a) 和 (b) 显示每一个试验样点都是排列在直线上或直线两侧，它们都与拟合的直线很近，所以这两个响应面模型能够很好地描述出零件的最大减薄率和最大起皱率。

4.6 制件成形质量优化模型

对于轿车后车门内板成形工艺参数优化，有两个目标函数最大减薄率 $X(x)$ 和最大起皱率 $Y(x)$ 。轿车后车门内板的成形工艺参数优化以最大减薄率和起皱率为目标，希望这两个优化目标都达到最小，然而，这两个优化目标之间存在着冲突，难以兼顾最优解。本节找到一个使制件成形质量达到最佳的优化模型，使最大减薄率和起皱率两个目标函数同时达到最优。

(1) 目标函数

目标函数借助加权组合法将多目标函数转化为单目标函数的优化模型，然后再求解该优化模型，得到的优化结果可以满足两个目标函数的要求，即按照如 (4-12) 定义。

$$F(x) = \rho_1 X(x) + \rho_2 Y(x) \quad (4-12)$$

其中 ρ_1 , ρ_2 为权重，表示最大减薄率和起皱率在优化模型中的重要性，且满足 $\rho_1 + \rho_2 = 1$ 。 ρ_1 , ρ_2 的取值，能控制最大减薄率和最大起皱率对优化模型的影响。取 $\rho_1 = 0.8$, $\rho_2 = 0.2$ 。

$$\text{即: } F(x) = 0.8X(x) + 0.2Y(x) \quad (4-13)$$

(2) 设计变量

选取模具间隙 x_1 、摩擦系数 x_2 、压边力 x_3 ，这三个拉延成形工艺参数进行研究，并对它们的上下边界作出约束。

(3) 约束条件

除了对三个自变量有了取值的约束之外， $X(x)$ 和 $Y(x)$ 还需要约束。虽然按照工厂要求减薄率不超过 30%，起皱率不超过 3%即可，但是为了零件成形质量尽可能最好，所以这里设置最大减薄率不能超过 25%，最大起皱率不能超过 2.8%，保证零件质量最优化。

$$\text{即: } \begin{cases} 0.56 \leq x_1 \leq 0.84 \\ 0.13 \leq x_2 \leq 0.17 \\ 1250 \leq x_3 \leq 1450 \\ X(x) \leq 25\% \\ Y(x) \leq 3\% \end{cases}$$

(4) 优化模型

经过上述分析，轿车后车门内板的成形质量的工艺参数优化问题的优化模型可写成下列形式：

$$\begin{cases} \min F(x_1x_2x_3) = \min[\rho_1X(x_1x_2x_3) + \rho_2Y(x_1x_2x_3)] \\ \quad = \min[0.8X(x_1x_2x_3) + 0.2Y(x_1x_2x_3)] \\ \quad \quad \quad \begin{cases} 0.56 \leq x_1 \leq 0.84 \\ 0.13 \leq x_2 \leq 0.17 \\ 1250 \leq x_3 \leq 1450 \\ X(x) \leq 25\% \\ Y(x) \leq 3\% \end{cases} \end{cases} \quad (4-14)$$

式中， $\min F(x)$ —期望单目标函数；

$X(x)$ 和 $Y(x)$ —最大减薄率和最大起皱率响应面函数。

(5) 优化模型的求解

在 Design Exper 软件中，对已经建立的优化模型进行多目标优化，采用了一种基于期望值的多目标优化方法，期望值愈高，则说明所得到的数值愈接近于理论最佳值，则可获得较优的零件成形品质^[62]。经运算对优化模型进行求解得到结果如表 4-6 所示，选择 100 组里期望值最大的解当作最优解，一般越靠前，期望值越大，所以选择第一组为多目标优化解，即模具间隙为 0.794mm，摩擦系数为 0.162，压边力为 1446.535kN。

表 4-6 优化模型的解集

序号	A(mm)	B	C(kN)	X(%)	Y(%)	期望值	
1	0.794	0.162	1446.535	23.382	2.692	0.957	Selected
2	0.791	0.162	1448.322	23.478	2.675	0.954	
3	0.837	0.167	1391.396	23.464	2.689	0.950	
4	0.836	0.163	1447.905	23.469	2.663	0.947	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
97	0.560	0.170	1268.568	22.763	3.162	0.859	
98	0.560	0.170	1250.014	22.434	3.163	0.846	
99	0.560	0.170	1260.491	22.621	3.164	0.828	
100	0.736	0.170	1250.001	22.174	3.299	0.802	

4.7 优化结果

通过上面的优化得到最优工艺参数组合，即模具间隙为 0.794mm，摩擦系数为 0.162，压边力为 1446.535kN。采用此组工艺参数组合代入 Autoform 中进行零件的成形仿真模拟，得到轿车后车门内板的 FLD 图，最大减薄率和最大起皱率云图。

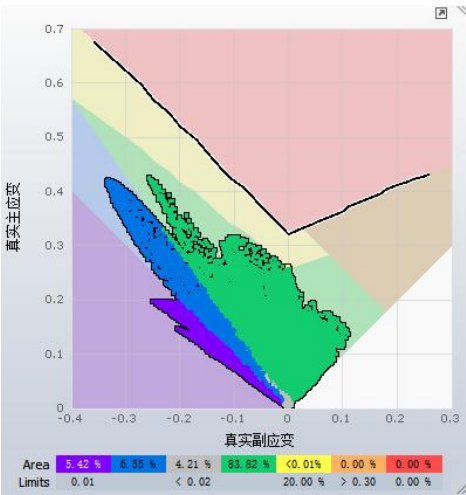
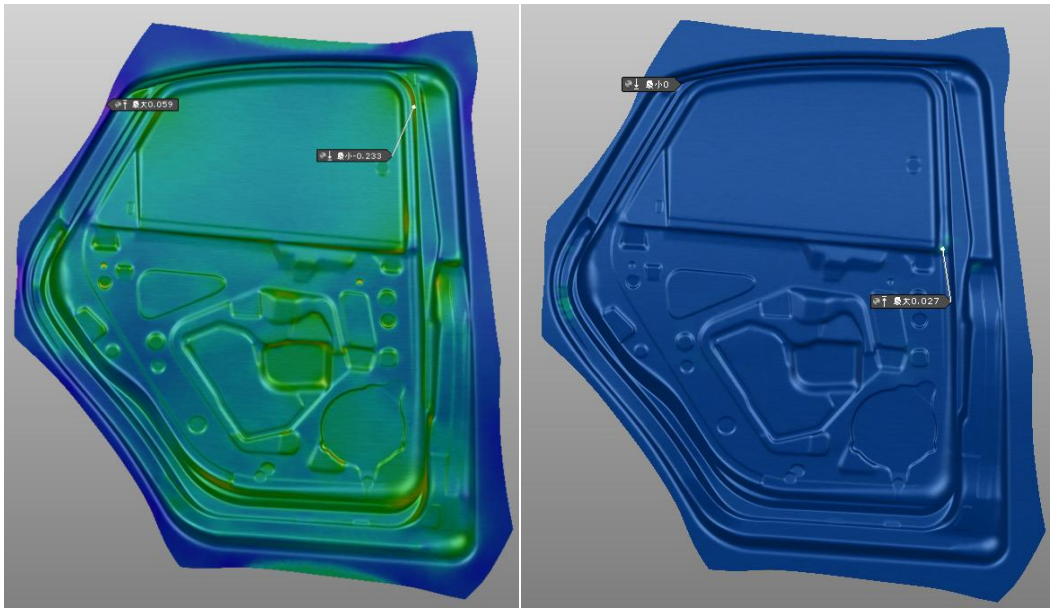


图 4-3 优化后轿车后车门内板 FLD 图

通过零件的成形极限图 4-3 可知，红色区域为 0，黄色区域小于 0.01%，说明此时零件无开裂和开裂的趋势。虽然紫色区域，蓝色和灰色区域比较多，但是

几乎全部位于零件的废料区，会在后续工序中对该部位进行去除，所以与零件有用部分没有关系，通过分析可得到轿车后车门内板零件成形质量良好。



(a) 优化后最大减薄率云图 (b) 优化后最大起皱率云图

图 4-4 优化后轿车后车门内板仿真模拟图

最大减薄率云图 4-4 (a) 和最大起皱率云图 4-4 (b) 表明，在优化得到的最优工艺参数组合下，零件的最大减薄率只有 23.3%，起皱率只有 2.7%，都达到了最优状态，提高了零件的成型质量。轿车后车门内板的最大减薄率和最大起皱率仿真模拟结果的实际值与响应面模型的预测值对比如表 4-7 所示。

表 4-7 实际值与响应面模型的预测值对比

参数	A(mm)	B	C(kN)	预测值		实际值		误差	
				X(%)	Y(%)	X(%)	Y(%)	X(%)	Y(%)
数值	0.794	0.162	1446.535	23.382	2.692	23.3	2.7	0.082	0.008

表 4-7 表明最大减薄率仿真模拟的实际值和预测值误差为 0.082%，最大起皱率仿真模拟的实际值和预测值误差为 0.008%，误差值均非常小，均在范围之内，建立的最大减薄率和最大起皱率的优化模型准确度非常高，因此上面优化得到的工艺参数组合可以作为多目标优化解。通过对最大减薄率与最大起皱率响应面模型进行加权组合，构建了单目标优化模型，并进一步优化工艺参数，成功得到最优工艺参数组合。该组合能够有效控制轿车后车门内板的最大减薄率和最大

起皱率，保持在理想范围内，为提升产品质量提供了可靠依据。

4.8 本章小结

本章通过 BBD 试验的结果建立了最大减薄率与最大起皱率的响应面模型，并将其转换为单目标优化模型，实现单目标优化模型优化求解，获得最优工艺参数组合。

(1) 简要介绍了用响应面方法进行板料冲压成形工艺参数优化的方法，Box-Behnken 试验设计具有的一些特点。

(2) 选取压边力，凹凸模间隙，摩擦系数为试验因素，最大减薄率，最大起皱率为评价指标，设计了三因素三水平的 BBD 试验，得到了 17 组试验数据。

(3) 建立了最大减薄率和最大起皱率的响应面模型。分别利用理论方法和适应图法检验响应面模型，得到两个响应面模型拟合度较高，可以利用它们进行参数优化。

(4) 把两个响应面模型通过加权组合法得到一个以零件成形质量为目标单目标优化模型，通过对优化模型寻优求解，获得了最优工艺参数组合，即具间隙为 0.794mm，摩擦系数为 0.162，压边力为 1446.535kN，在该组合下零件的最大减薄率为 23.3%，最大起皱率为 2.7%，零件成形质量达到最优状态。

第 5 章 轿车后车门内板拉延模具磨损过程及磨损量研究

实际零件冲压由于冲压模具的核心与板材的相互接触，它们在接触面会产生剧烈的摩擦，这种摩擦可能导致模具的磨损。本章利用 Deform-3D 软件对模具磨损过程进行仿真模拟，探究不同的工艺参数对磨损量的影响，并通过不同的方法找到最优工艺参数组合，减小模具的磨损量。

5.1 冲压模具磨损理论

冲压模具是在金属冲压过程中使用的工具，因而在使用中会经历一定程度的磨损。冲压模具的磨损会影响产品质量、生产效率和模具寿命^[63]。制定合理的冲压工艺，选择适当的模具材料和设计，以及定期进行维护和更换，都是降低冲压模具磨损的有效手段。

5.1.1 冲压模具的失效形式

冲压模具的失效形式包括磨损失效、断裂失效和塑性变形失效三种类型^[64]。

（1）磨损失效

冲压模具在工厂正常使用期间，因为工厂有着不良的工作环境，并且长时间与板料进行接触，不间断的对板料进行加工制造，模具与模具之间，模具与板料之间会产生相互摩擦，所以会导致冲压模具表面产生许多划痕，划痕积累越来越多模具的外表面会遭受破坏，进而冲压模具的表面磨损会不断加深，因此在以后的冲压过程中对板料的冲压工作达不到相应的精度要求，磨损失效^[65]是机械加工过程中一种常见的失效形式，最普通一种失效方式。

（2）断裂失效

断裂失效是冲压加工过程中最有破坏力的一种失效形式，当模具在恶劣的工作环境中长时间不间断的工作，模具可能遭到各种情况，这时模具可能会产生非常大的裂纹或者更严重直接断成两部分，此时可能或造成工厂人员伤亡，十分严重。断裂失效又分为疲劳断裂和直接断裂，疲劳断裂是在日常的冲压过程中，工件对模具侧面会有力的作用^[66]，在日积月累反反复复的冲压过程中，形成了交变

应力，导致凹凸模侧面产生应力集中从而产生裂纹，伴随着裂纹的逐渐的增大，最后编程断裂；直接断裂更为严重，模具在冲压过程中，表面会受到非常大的冲击载荷或者不均匀的在和，超出模具的受力极限导致直接断裂。

（3）塑性变形失效

塑性变形失效是冲压模具在日常的工作过程中，由于冲压模具当初设计的原因，当出现应力集中在某块区域时，此时模具自身的屈服强度低于过大的集中应力，这个时候冲压模具就会发生塑性变形，当塑性变形超过一定的极限的时候，会导致模具的尺寸和形状发生变化且不能恢复原来的状态，最终这样的模具将不能够再正常使用而被抛弃。塑性变形常表现为弯曲、塌陷和镦粗等。

5.1.2 磨损种类

模具磨损是指模具在使用过程中受到磨擦、冲击、腐蚀等因素的作用而逐渐失去原有形状和尺寸的过程。根据磨损的性质和原因，可以将模具磨损分为磨粒磨损，粘着磨损，疲劳磨损，腐蚀磨损^[67]。

5.2 拉延模具三维模型的建立及导入

本文采用局部冲压分析方法，聚焦于关键磨损部位的工作状况，以便更好地理解并优化模具性能。根据 Autoform 的分析可以看出凸模磨损最为严重的地方是在凸模圆角刃口处最为严重，因为刃口处最为突起，所遭受的压力比较繁多，磨损较为严重。考虑到模具的尺寸较大构造复杂，网格的划分和计算容易出错，有限元求解的精度非常低与时间比较长，所以在不破坏模具本身力学性能和功能的前提下，把一些不必要的结构可以忽略，在对照着模具及坯料的结构前提下简化各零件的部分^[68]。

通过轿车后车门内板圆角的尺寸简化后得到的拉延模具的三维模型如图 5-1 所示为了方便 Deform-3D 的数值模拟过程^[69]，采用原模型的四分之一建立的三维模型，虽然原来的冲压模具采用倒装模具，但是在 Deform-3D 中一般都是采用正装模具进行模拟，所以在三维软件中绘制的三维模型也采用正装模具的装配关系。

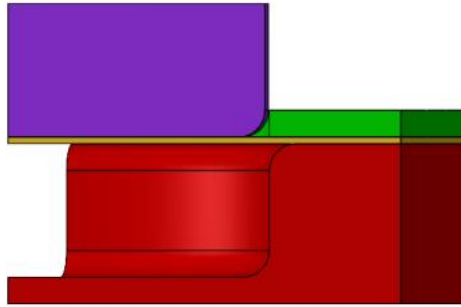


图 5-1 拉伸模具三维模型简图

建立的三维的几何模型不能直接导入到 Deform-3D 中，首先使用 SOLIDWORKS 绘制好的所需要的凸模，凹模，压边圈和板料的三维模型并装配好，另存为 STL 格式文件。

这里选择 Cr12 模具钢作为冲压模具的材料，Cr12 钢材是应用广泛的冷作模具钢，具有高强度、较好的淬透性和良好的耐磨性，但冲击韧性差。在 Deform-3D 的材料库中选择 Die material 中的 AISI-D3 钢，其材料性质如图 5-2 所示。

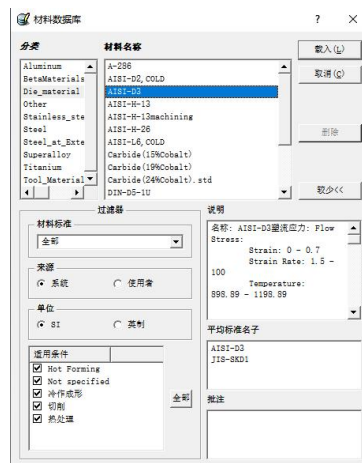


图 5-2 AISI-D3 钢材料性质

板料的材料为 DC07 低碳钢，本文从 Autoform 中调取 DC07 材料的性质创建材料库导入到 Deform-3D 中。

5.3 网格划分及无关性证明

网格划分是进行数值仿真分析的关键步骤，其精度将直接影响到随后的数值计算和分析结果的准确性^[70]。相对来说如果网格数量划分的越多，数值模拟的结果越精确，但是所产生的后果是分析的时间过长，如果想要分析时间短，则划分网格数量少，但此时计算结果可能不会精确。

这里采用手动划分网格方式，手动设置网格使用的是  下的  绝对值方式，用户能够自定义板料网格的尺寸范围，包括最小和最大网格尺寸，以及两者之间的比值。网格类型可灵活选择实体单元或壳单元，单元尺寸通常在 1~10mm 之间。在网格尺寸限定的过程中，采用绝对法设定最小元素尺寸为 1mm，并通过设置尺寸比为 2 来确定最大元素尺寸为 2mm^[71]。系统可根据设定的元素尺寸进行计算得出各工具体积的网格数量，具体划分参数如表 5-1 所示。

表 5-1 网格具体划分参数

类型	类型	最小尺寸 (mm)	最大尺寸 (mm)	数量
凸模	四面体	1	2	136443
凹模	四面体	1	2	310349
板料	四面体	1	2	169983
压边圈	四面体	1	2	140103

为了验证划分的网格既满足分析的时间不会过长，又可以使数值模拟的精度比较精确，这里设计对照实验来验证划分的网格的可行性。采用 0.6，1.3，1.8 倍的网格数作为比较试验，其余的设定不变，得到的结果见表 5-2。

表 5-2 网格比较试验结果

类型	模具磨损量 (mm)	分析时间
比较组	$2.96775215 \times 10^{-6}$	/
0.6 倍	$2.68924423 \times 10^{-6}$	较短
1.3 倍	$2.96775215 \times 10^{-6}$	较长
1.8 倍	$2.96775215 \times 10^{-6}$	最长

表 5-2 显示，当网格数量比对照组少时，最大元素尺寸和最小元素尺寸会发生改变，导致分析的结果比较粗略，只能大概计算出模具磨损量的结果，分析结果不准确。在网格个数超过 1.3 倍以后，对模具磨损量的仿真结果并没有发生变化，所以可以认为，最初设置的网格个数的计算结果与实际值是相近的。但是 1.3 倍以上时，网格数量比较多，造成的后果是软件计算时间过长，所以没有必要设置这么多的网格数量。

表 5-2 设定的网格数量既可以满足所需要的软件数值模拟的精度，又可以让软件分析的时间不会过长，所以只要满足一定的计算精度，划分的网格个数对计算结果没有太大的影响。

5.4 仿真模拟

本文需要研究模具磨损的最大磨损量的大小，由于模具尺寸较大，在工厂进行实际试验不仅耗费大量的人力与资金，还会造成不必要的生产事故，所以首先需要把简化模具导入到 Deform-3D 进行仿真模拟，在软件中就可以直观得到模具磨损量的大小，还可以不断调整参数，进行多次模拟，提高效率。

5.4.1 约束与边界条件的设置

选中物体的凹模，单击“边界条件”按钮，选中对称面选项，分别选择凹模的两个对称面，确认添加。选中凹模所需要设置的热交换面，确认设定，则完成对称面余热交换面的设定。如图 5-3 所示，工具体是以凹模为例的对称表面的设定，选择红色标记的表面作为对称表面，蓝色的区域作为热交换面，剩下的三个工具体的设置要求与凹模相同。

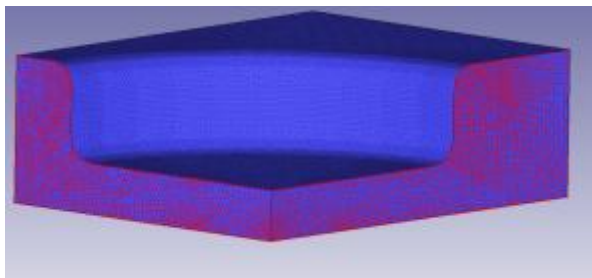


图 5-3 凹模的热交换面

在进行有限元模拟时，为了加快冲压速度，可以使用虚拟速度，减少了分析所需的时间。本文模拟采用的是正装模具的装配关系，因此需要对凸模添加-Z方向的冲压速度，第一次冲压速度设置为 20mm/sec。

在模具磨损数值仿真中，模具硬度是一个很重要的参数，对于工具体来说，硬度是一个重要的参数。因此要设定首次数值模拟的模具硬度，通常模具的表面硬度在 55~65HRC 的范围之内，所以本次模拟设置的初始硬度为 58HRC。

根据正装模的结构特征，在模拟冲压工艺中，将凹模装在下模底座上，因此凸模往下移动，在压力机作用下按压板料，使板料被压入凹模成为所需要的形状，板料在压边圈的保护下能够保证成形过程不被破坏^[72]。所以板料与凸模，凹模，压边圈都会产生接触，在设定接触边界条件时，同意系统建立的默认关系，如图 5-4 所示。



图 5-4 接触边界条件的设置

Deform-3D 中存在三种不同的摩擦模型：剪切、库伦和混合三种^[73]，其中法向应力较小时适用于库伦摩擦模型；在法向应力过大时，库伦摩擦力与实测值之间存在很大的偏差。通过对拉延模具板材成形工艺进行理论分析，得出了板材与凸、凹模间的摩擦以剪切摩擦为主的结论，因此接触面的摩擦系数采用系统设定的 0.12，热传系数设置为 0.004。

为了能够较为准确的预测出模拟冲压成形后模具磨损的深度，将采用软件中有的经典 Archard 模型的方法来预测模具磨损的深度，软件给出了 Archard 模型的计算方法的公式，通过公式可以较为准确模拟出模具磨损的深度，如图 5-5 所示。

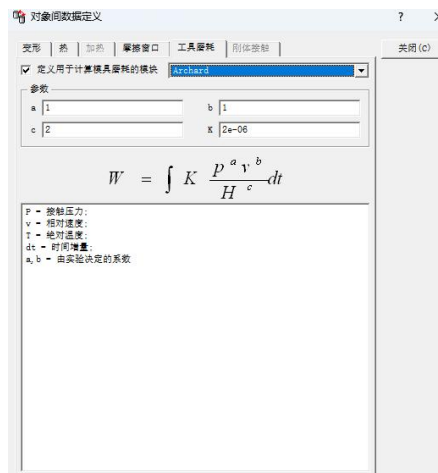


图 5-5 Archard 模型的选取

图 5-5 中给出了经典 Archard 模型的计算式如式（5-1）。

$$W = \int K \frac{P^a v^b}{H^c} dt \quad (5-1)$$

式中， W —模具磨损的深度(mm)；

K —比例系数，一般取 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ ；

P —板料与工具体接触面之间的法向应力(MPa)；

H —模具硬度(HRC);

a, b, c —常数因子。

在板材成形中, 式(5-1)中 a, b, c 可以分别取 1, 1, 2, 比例系数 K 设定为 2×10^{-6} 。将第一组的关系设置应用于第二组和第三组, 最后生成三组对象间关系。

5.4.2 步长设置

本文选择 SI 国际单位制, 选用 Lagrangian Incremental 增量形式。由于在数值模拟的分析过程中, 板料在凸模的作用下发生变形, 这个过程中伴随中热量的变化, 并且上述过程中有热交换面的设置, 因此需要在模拟控制的基本设定中把变形和热传勾选上。

首先对步进的设定进行了探讨, 通常将步长设定在工件网格最小尺度的 $1/3 \sim 1/5$ 之间, 并尽可能取小而不取大。由于在进行数值仿真时, 增量步长是指模具每一次挤压工件的间距或者工件的变形幅度, 如果工件变形太大, 网格单元就会产生很大的改变, 从而导致单元变形。这里步数设置为 0.5mm/step , 凸模在冲压过程中的下压行程设置为 60mm , 所以根据凸模的下压量和步数设置, 得到整个冲压模拟的总步数为 120 步, 为了使模拟的过程更加精确, 分析过程更加方便, 可以清晰看出整个模拟过程模具的磨损量, 因此设置每 4 步储存一次数据。以上所有程序是模拟的前处理过程, 最后对文件进行求解运算。

5.4.3 初次仿真模拟结果分析

在设置完成各种参数以后进行初始的仿真模拟, 通过 Deform-3D 中一次完整的拉延模拟, 得到模具的最高磨损量为 $2.96775215 \times 10^{-6}\text{mm}$, 主要磨损位置出现在圆角过渡处。轿车后车门内板拉延模具的磨损情况可通过简化模型来近似评估。该模型保留了模具的外形、圆角等关键尺寸, 其磨损量可视为实际生产中的磨损量。主要磨损位置如图 5-6 所示。

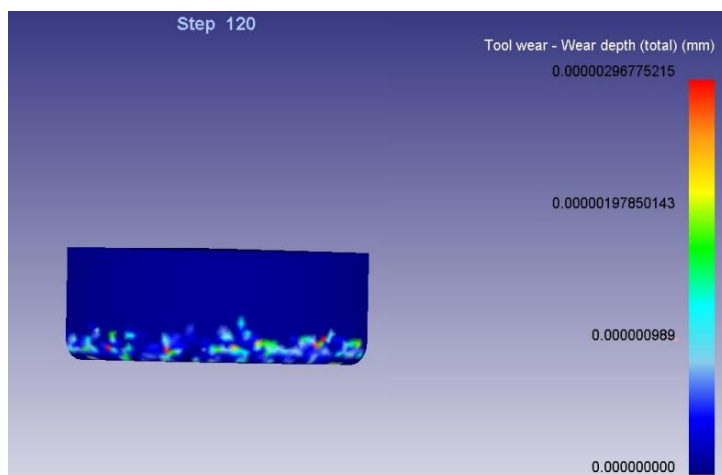


图 5-6 凸模拉伸过程初次仿真模拟磨损量云图

5.5 轿车后车门内板拉伸模具磨损因素研究

通过 Deform-3D 对简化模型的仿真模拟的结果可以得出，随着冲压次数的不断增加，冲压模具的磨损量也会不断加深，模具的寿命会随之不断减少。在工厂的生产过程中，因为每次的冲压过程的作业是影响模具单次磨损量，此时磨损量比较小，工人师傅不能够直接观察得出模具磨损量，只有成千上万次的磨损量的积累才能够得出模具的磨损。

5.5.1 各个成形工艺参数对模具磨损量的影响

影响轿车后车门内板拉伸模具磨损量的因素有很多，而通过在实际生产中的调查，发现冲压速度、模具硬度、摩擦系数和模具间隙对模具磨损量影响程度较大，所以将对这些试验因素进行分析。

(1) 冲压速度。在冲压工艺中，冲压速度的高低直接关系到生产率和模具使用寿命^[74]。当冲压速度过小时，冲压模具与板料的相互接触的时间长，导致接触面表面的温度升高，磨损程度增加，因为板料需要冷冲压成形，温度升高会导致板料不能在很短的时间内完成冲压成形，严重破坏零件的成型质量。但是当冲压速度过大时，模具与板料接触面的摩擦会变大，模具所承受的载荷也会变大，导致冲压模具会更快地磨损，但是当冲压速度超过一定的极限值以后，模具的磨损量会随着冲压速度的升高而降低，因为在仿真模拟中的环境是良好的，冲压过程中十分平稳，无振动的。

(2) 模具硬度。模具硬度是材料的一个非常重要的参数，它可以在某种程度上反映出材料的抗塑性变形或抗剪切破坏性能。模具硬度越小，那么在工作过程中因为非常软易造成磨损，相反的模具硬度越大则材料会越脆，当受到大的冲击载荷的时候容易突然断裂^[75]。

(3) 摩擦系数。当冲压模具日积月累的工作后，凸模因为不断地与板料表面进行接触^[76]，它的表面会出现不同深度的划痕，由于相互接触的表面的粗糙程度在不断增加，导致冲压模具与板料之间的摩擦系数不断增大，模具的磨损程度会不断加剧。

(4) 模具间隙。凸凹模具间隙指的是在模具装配过程中两个模具之间留下的空隙或间隔。这个间隙对于模具的正常运作和生产过程中的制品质量具有重要影响。凸凹模间隙过大，在冲压成形过程中精度可能会降低，导致尺寸不准确，而且凹模与凸模之间会产生相对较大的位移，导致成形质量降低。凸凹模的间隙越小，在冲压时，凹凸模间的摩擦就越大，这将使冲压模具的磨损变得更快，模具的寿命会严重缩短，此时需要经常对模具的维修或者更换，降低成本。

5.5.2 田口正交试验设计

影响模具磨损量的因素非常的多，但是在实际生产过程中是无法测试出来的，只有通过仿真软件进行数值模拟的方法，设置不同的工艺参数，通过软件仿真得到单次冲压最小磨损量^[77]，研究各种工艺参数的组合下，冲压模具最小的磨损量。

(1) 试验因素

模具磨损量是由众多因素共同作用的结果，通过上述的分析，选取影响最严重的四个工艺参数，冲压速度、模具硬度、摩擦系数、模具间隙作为试验因素，每个工艺参数选取四个水平如表 5-3 来研究对模具磨损量大小的影响。

表 5-3 试验因素水平选取表

因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
摩擦系数	0.12	0.13	0.14	0.15
冲压速度/ ($mm \cdot s^{-1}$)	10	20	30	40
模具硬度/HRC	55	58	61	64
模具间隙/mm	0.7	0.77	0.84	0.91

(2) 评价指标

本文为了分析模具的寿命情况,而模具磨损深度是最能够体现模具寿命的长短,通过在 Deform-3D 中仿真模拟简化模具单次磨损量的深度,最为田口正交试验的评价指标。

(3) 田口正交试验

利用田口正交试验来研究冲压工艺参数对模具磨损量的影响,按田口正交试验原则,选择 $L_{16}(4^4)$ 的正交试验表^[78],表 5-4 内 A, B, C, D 因素分别代表摩擦系数,冲压速度,模具硬度,模具间隙,通过对各种工艺参数的组合,得出了模具的磨损量。

表 5-4 田口正交试验模拟仿真模具的磨损量结果

试验	试验因素				评价指标
编号	A	B ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	C (HRC)	D (mm)	磨损量 ($\times 10^{-6}\text{mm}$)
1	0.12	10	55	0.7	2.96775215
2	0.12	20	58	0.77	2.98435634
3	0.12	30	61	0.84	2.68393865
4	0.12	40	64	0.91	2.94900451
5	0.13	10	58	0.84	2.57663419
6	0.13	20	55	0.91	2.88723822
7	0.13	30	64	0.7	2.06922005
8	0.13	40	61	0.77	2.44513672
9	0.14	10	61	0.91	2.70754845
10	0.14	20	64	0.84	2.23269490
11	0.14	30	55	0.77	2.69216503
12	0.14	40	58	0.7	2.66328584
13	0.15	10	64	0.77	2.00408908
14	0.15	20	61	0.7	2.59227136
15	0.15	30	58	0.91	2.36548544
16	0.15	40	55	0.84	2.62876256

5.5.3 信噪比分析法

信噪比是用于衡量信号质量的一个重要指标^[79]。它代表一个信号与噪声的相对强度或功率之间的比值。较高的信噪比表明，该信号具有较强的抗噪音能力和较好的品质^[80]。在各种信噪比表（5-5）下，可根据试验对象的不同进行选取。

表 5-5 信噪比分析法的分类

信噪比	试验目标	数据特征	计算公式	备注
望大特性信噪比	使响应最大化	正	$\eta = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$	
望目特性信噪比	以响应为目标 且要使信噪比 以均值和标准 差为基础	具有“绝对零” 的非负数，其 中在均值为零 时标准差为零	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ $\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ $\eta = 10 \lg \left(\frac{\bar{y}^2}{\hat{\sigma}^2} \right)$	公式中： $\bar{y}$ —样本均值； y_i —样本； $\hat{\sigma}$ —样本偏差； n —试验次数
望小特性信噪比	使响应最小化	负	$\eta = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$	

利用信噪比对模具磨损量进行数据分析，基于信噪比对正交表重新计算，因为希望得到的试验指标越小越好，所以采用望小特性信噪比才能使响应最小化，把正交表中的数据带入望小特性信噪比计算公式得到表 5-6。

表 5-6 信噪比对模具磨损量进行数据分析表

编号	因素				信噪比 η
	A	B（mm·s ⁻¹ ）	C（HRC）	D（mm）	
1	0.12	10	55	0.7	-9.448552566
2	0.12	20	58	0.77	-9.497013556
3	0.12	30	61	0.84	-8.575451688
4	0.12	40	64	0.91	-9.393508735
5	0.13	10	58	0.84	-8.221055305
6	0.13	20	55	0.91	-9.209652362
7	0.13	30	64	0.7	-6.316133558
8	0.13	40	61	0.77	-7.766062955

9	0.14	10	61	0.91	-8.651524736
10	0.14	20	64	0.84	-6.976587607
11	0.14	30	55	0.77	-8.602033573
12	0.14	40	58	0.7	-8.508355601
13	0.15	10	64	0.77	-6.038340433
14	0.15	20	61	0.7	-8.273609234
15	0.15	30	58	0.91	-7.478405585
16	0.15	40	55	0.84	-8.395027214

(1) 极差分析

根据表 5-7 中得出来的信噪比的数据, 利用极差分析的方法得到各个工艺参数组合对磨损量影响趋势, 对表中数据进行处理得到表 5-7。

表 5-7 极差分析分析表

	因素			
	A	B ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	C (HRC)	D (mm)
I_1	-36.91452654	-32.35947304	-35.65526572	-32.54665096
I_2	-31.51290418	-33.95686276	-33.70483005	-31.90345052
I_3	-32.73850152	-30.9720244	-33.26664861	-32.16812181
I_4	-30.18538247	-34.06295451	-28.72457033	-34.73309142
$\bar{I}_1$	-9.228631636	-8.08986826	-8.913816429	-8.13666274
$\bar{I}_2$	-7.878226045	-8.48921569	-8.426207512	-7.975862629
$\bar{I}_3$	-8.184625379	-7.743006101	-8.316662153	-8.042030454
$\bar{I}_4$	-7.546345616	-8.515738626	-7.181142583	-8.683272854
R	1.68228602	0.772732525	1.732673846	0.707410225
$\bar{Y}$	-8.209457169			

因采用的是望小特性信噪比, 对应的函数是减函数, 所以当信噪比值越大, 对应的期望值反而越小, 根据表 5-8 中数据, 为了最大限度减小模具磨损, 应该选择的工艺参数组合是 $A_4B_3C_4D_2$, 那么摩擦系数为 0.15, 冲压速度为 30mm/s, 模具硬度为 64HRC, 模具间隙为 0.77mm, 此时信噪比均值最大, 模具磨损量最小^[81]。

(2) 方差分析

为了了解各组工艺参数组合对磨损量的影响程度,这里采用方差分析的方法对表 5-7 中的数据进行了处理。

各个试验因素的偏差平方和如式 (5-2)。

$$S_a = \sum_{i=1}^n (\bar{I}_j - \bar{Y})^2 \quad (5-2)$$

式中, $\bar{I}_j$ —每个试验因素下某水平下的平均值;

$\bar{Y}$ —所有信噪比的均值

总偏差平方和如式 (5-3)。

$$S_e = \sum_{i=1}^n S_{ai} \quad (5-3)$$

式中, S_{ai} —某一因素的偏平方和

平均偏差平方和如式 (5-4)。

$$\hat{S}_a = \frac{S_a}{f_a} \quad (5-4)$$

式中, f_a —试验因素的自由度

影响程度如式 (5-5)。

$$P = \frac{S_a}{S_e} \times 100\% \quad (5-5)$$

通过上述计算公式,可得到偏差平方和与总偏差平方和的比值,最终得到四个试验因素对评价指标磨损量的影响程度的大小^[82],通过公式 (5-2)、(5-2)、(5-4) 和 (5-5) 得到如表 5-8 所示的磨损量方差。

表 5-8 磨损量方差分析表

试验因素	偏平方和/ S_a	自由度/ f_a	均方值/ $\hat{S}_a$	影响程度/P
A	1.588764201	3	0.529588067	40.55928671%
B	0.403951267	3	0.134650422	10.31240208%
C	1.612026474	3	0.537342158	41.15314526%
D	0.312398447	3	0.104132816	7.975165953%
Se	3.917140389	12		

根据上表中的数据分析可得,所选取的四个工艺参数中,模具磨损量影响最大的因素是模具硬度和摩擦系数,达到了 41.15314526%和 40.55928671%,冲压速度和模具间隙对模具磨损影响程度较小,两者都差不多。不同的成形工艺参数

对模具的磨损量的影响大小为：模具硬度>摩擦系数>冲压速度>模具间隙。

5.5.4 优化结果分析

采用信噪比分析方法优化选出了最佳工艺参数组合，即在摩擦系数为 0.15，冲压速度为 30mm/s，模具硬度为 64HRC，模具间隙为 0.77mm 的条件下，模具磨损量最少。把这组工艺参数组合带入到 Deform-3D 软件中进行仿真模拟，得到模具磨损量如图 5-7 所示。

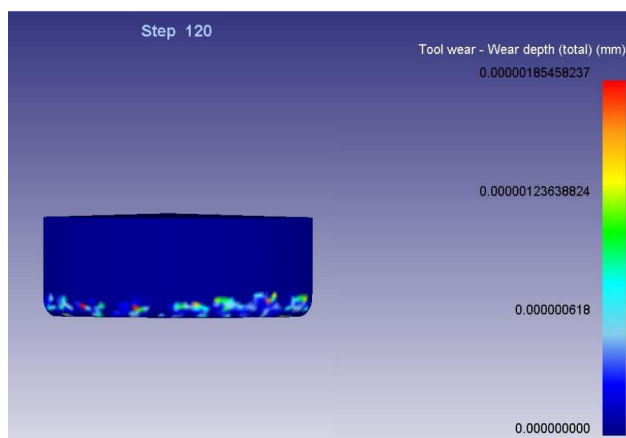


图 5-7 信噪比分析后凸模拉延过程仿真模拟磨损量云图

通过数值模拟得到模具的最大磨损量为 $1.85458237 \times 10^{-6} \text{mm}$ ，且磨损主要位置依旧处在凸模刃口处，因此该分析结果符合理论分析及加工实际。

5.6 模具磨损量经验公式建立

由上述分析可知，模具的磨损量受四个工艺参数数值共同影响，通过信噪比分析的方法可得到各个工艺参数对磨损量的影响程度的大小，但是无法确定自变量与因变量之间的线性关系。本节通过建立多元线性回归模型得到各个工艺参数与磨损量之间的线性关系，为工厂的实际生产制造提供指导与支持。

5.6.1 多元线性回归模型建立

多元线性回归分析，实际上就是用若干个变量的观察数据，在多个变量和因变量间建立一种因果关系，通过线性回归我们可以用模型去描述数据中是否存在相关性，一般情况下是建立多个属性元素的线性组合的预测函数来表示这个多元线性模型，如式（5-6）所示。

$$Y = \varepsilon + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n \quad (5-6)$$

式中, β_i —权重系数, x_i —因变量, $i = 1, 2, 3, \cdots, n$;

ε —常量系数。

选择冲压速度、模具硬度、摩擦系数、模具间隙为自变量, 磨损量为因变量, 自变量与因变量一起输入到 SPSS 中并进行线性回归分析, 得到的分析结果如下:

表 5-9 模型摘要表

模型	R	R ²	调整后的R ²	标准估算的误差
1	0.804	0.646	0.517	0.20988875679

通过表 5-9 中的数据可知, R—相关系数, 用于衡量四个工艺参数与磨损量之间相关程度的系数, 当相关系数的绝对值越接近 1, 说明变量之间的相关程度越高, 此表中 R 的值为 0.804, 代表此回归模型的相关程度良好^[83]。R²—决定系数, 又称拟合优度, 通常用来描述数据对模型拟合程度的好坏, 表示四个工艺参数对磨损量的解释程度, 此表中R²的值为 0.604, 说明模型拟合程度良好。表 5-9 中标准估算误差值为 0.20988875679, 相对较低, 这表明模型预测精度较高, 能够较为准确地反映实际结果与模型计算结果之间的关系。

表 5-10 ANVOA 表

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性 p
回归	0.885	4	0.221	5.020	0.015
残差	0.485	11	0.044		
总计	1.369	15			

该表 5-10 为方差分析 (ANVOA) 表, 主要是判断模型整体是否具有显著性, 如果显著性 $p > 0.05$, 那说明几组数据之间是没有明显的差异, 而如果显著性 $p < 0.05$, 则说明几组数据之间是有显著差异的。通过上表可以看出 F 值为 5.020, 显著性为 0.015, 小于 0.05, 所以说明回归方程具有显著性。

表 5-11 系数表

模型	未标准化系数		标准化系数	t	显著性
	B	标准误差	Beta		
(常量) ε	6.884	1.255	0	5.484	0.000
摩擦系数 β_1	-14.165	4.693	-0.541	-3.018	0.012
冲压速度 β_2	0.013	0.005	0.176	0.216	0.033

模具硬度 β_3	-0.049	0.016	-0.566	-3.155	0.009
模具间隙 β_4	0.659	0.670	0.039	0.984	0.046

表 5-11 中的标准化系数的绝对值的大小可以表示各个工艺参数对模具磨损量的影响程度，则影响因素的大小为：模具硬度 > 摩擦系数 > 冲压速度 > 模具间隙，与上述信噪比分析方法得到的结果相同。通过上表看显著性水平，可以看出 $\varepsilon, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 的 p 值均小于 0.05，所以四个工艺参数均有显著性，说明四个工艺参数对于磨损量均有显著性影响，因此利用表 5-8 中非标准化系数建立线性回归模型，得到结果如式 (5-7)。

$$Y = 6.884 - 14.165x_1 + 0.013x_2 - 0.049x_3 + 0.659x_4 \quad (5-7)$$

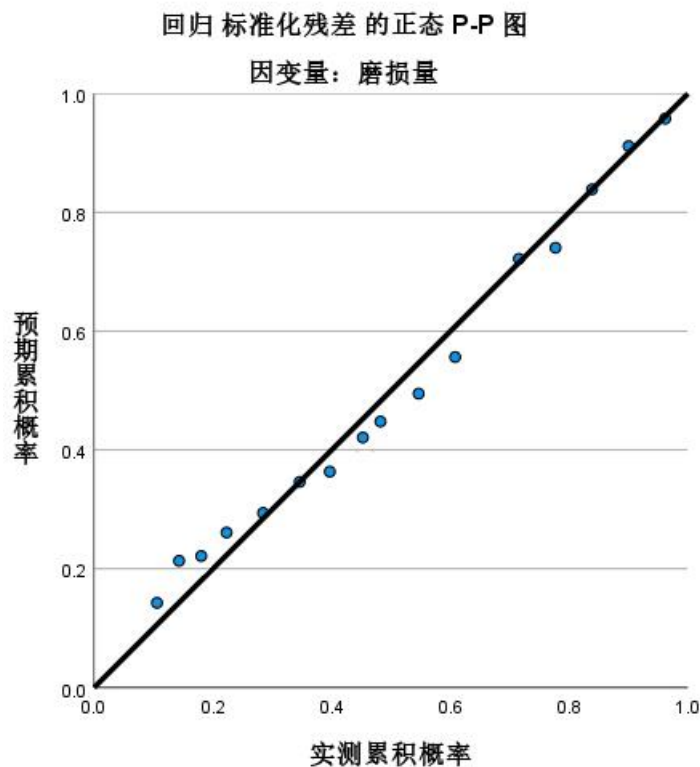


图 5-8 回归标准化残差的正态 P-P 图

回归标准化残差的正态 P-P 图 5-8 显示数据点基本呈对角分布，说明预期累积概率与实测累积概率非常接近，数据符合正态分布。

5.6.2 统计试验值与计算值

将正交试验的试验值与通过回归模型计算出来的计算值统计到表 5-12 中，并计算出试验值与计算值之间的误差。

表 5-12 试验值与计算值之间的误差表

序号	试验值/ $\times 10^{-6}mm$	计算值/ $\times 10^{-6}mm$	误差/ $\times 10^{-6}mm$
1	2.96775215	2.96050	0.00725
2	2.98435634	2.86963	0.11473
3	2.68393865	2.77876	-0.09482
4	2.94900451	2.78789	0.16111
5	2.57663419	2.76411	-0.18748
6	2.88723822	2.96724	-0.08000
7	2.06922005	2.25785	-0.18863
8	2.44513672	2.60098	-0.15584
9	2.70754845	2.52159	0.18596
10	2.2326949	2.33846	-0.10577
11	2.69216503	2.74333	-0.05116
12	2.66328584	2.56020	0.10309
13	2.00408908	2.14068	-0.13659
14	2.59227136	2.40155	0.19072
15	2.36548544	2.54694	-0.18145
16	2.62876256	2.65781	-0.02905

利用上表计算出来的数据,得到试验值与计算值的分布图 5-9 与误差图 5-10,通过这两张图可以更加清晰看出回归模型计算预测的准确度,如下图所示:

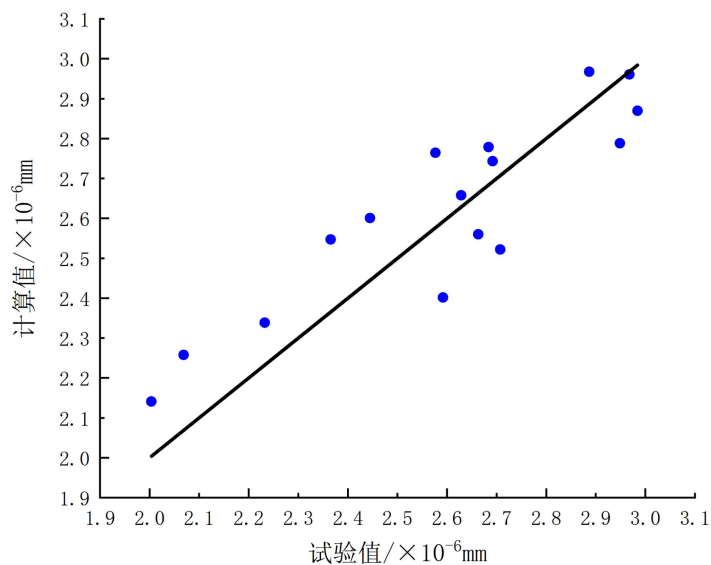


图 5-9 试验值与计算值的分布图

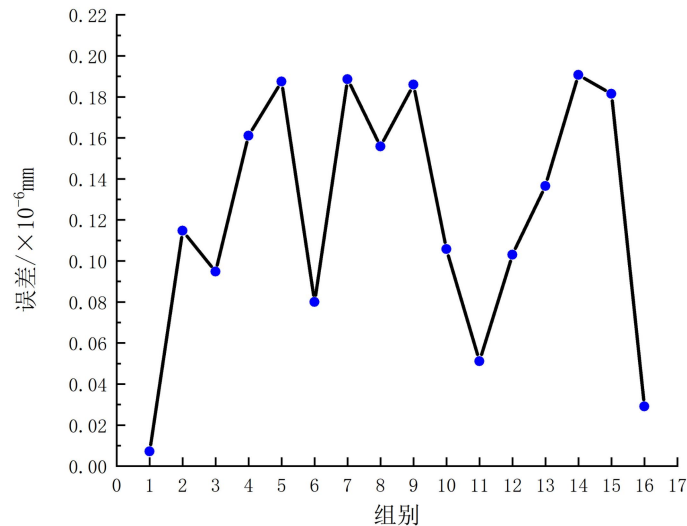


图 5-10 试验值与计算值的误差图

由于模具磨损量的单位是 10^{-6}mm ，精度非常小，因此上图中的试验值结果与理论计算结果吻合得很好，从试验结果与计算结果的误差图可以看出，两者之间误差均小于 0.20，所以试验值与计算值误差很小，搭建的磨损量的多元回归模型准确度较高。

5.7 本章小结

本章概述了轿车后车门内板拉伸模具在拉伸过程中的失效形式和磨损过程等，基于 Deform-3D 对拉伸模具的磨损仿真模拟，并利用信噪比优化得到了部分的最优工艺参数组合。

(1) 概述了模具磨损的理论，冲压模具的失效形式包括磨损失效和断裂失效，磨损种类包括磨粒磨损，粘着磨损，疲劳磨损，腐蚀磨损。

(2) 把零件导入到仿真软件中，并进行网络划分及无关性的证明，通过 Deform-3D 中一次完整的拉伸模拟，得到模具的最高磨损量为 $2.96775215 \times 10^{-6}\text{mm}$ ，主要磨损位置出现在圆角过渡处。

(3) 把模具磨损量作为评价指标，摩擦系数、冲压速度、模具硬度和模具间隙作为试验因素设计了田口正交试验，利用信噪比分析法优化，得出了所选数据中的最优工艺参数组合，即摩擦系数为 0.15，冲压速度为 30mm/s，模具硬度为 64HRC，模具间隙为 0.77mm，各个成型工艺参数对模具磨损量影响程度大小依次是：模具硬度>摩擦系数>冲压速度>模具间隙，经检验此时的模具的磨损量

为 $1.85458237 \times 10^{-6} \text{mm}$ 。

(4) 提出了轿车后车门内板模具磨损量与工艺参数之间的经验公式。通过 SPSS 对正交试验数据进行分析，通过建立多元线性回归方程表达模具磨损的经验公式，最后利用经验公式计算出的计算值与试验值相比较，验证了模具磨损的经验公式的准确性。

第 6 章 基于 BP 神经网络和萤火虫算法的工艺参数优化

在某些情况下，随着拉延的继续，摩擦力可能会出现非线性变化，板料与模具之间的相互作用是非线性变化的，模具的磨损量和工艺参数之间的线性变化关系很难被找出来。上一章通过信噪比得到的最佳工艺参数组合只是局部的最优值，并不是全局最优解，所以本章将搭建以摩擦系数，冲压速度，模具硬度，模具间隙与模具磨损量之间的 BP 神经网络模型，并利用萤火虫算法优化神经网络模型的连接权值和阈值，可以在复杂的参数空间中找到全局最优解。

6.1 模具磨损量的预测方法

经验判断法是指利用一些经验较资深的模具工作者们，将他们利用了许多年的模具操作经历，对生产工作中的模具的损坏情况，与所制造工件的表面情况如擦痕、毛刺等等加以研究和比较，大致揣摩模具的磨损量^[84]。但是不同的人上班的时间长短，上班场所不同，观察所得到的结论就会差异，导致这种方式产生很大的偏差。

磨损累积法是在实践中发现，当冲压模具冲压次数达到几千次以后，模具的磨损量就会由很大的变化，但是次数很少时模具磨损量几乎不改变^[85]。在此基础上，选取 1000~2000 次作为实验组，对其进行数值模拟，获得累计磨损量，并将其叠加成冲压件的总磨损量。这个方法虽然大大节省了仿真模拟的工作量，但也有一定的误差，且需要将疲劳失效的情况排除在外。

近几年来，人们对神经网络的研究日趋成熟，也有学者提出了采用 BP 神经网络进行模具寿命预测的方法。BP 神经网络与传统的计算机模拟仿真不同，它利用 Archard 磨损模型^[86]，通过大量计算获得所需参数，相对来说更有利于模具优化及开发。针对仿真模拟的数据进行训练的流程如图 6-1 所示：

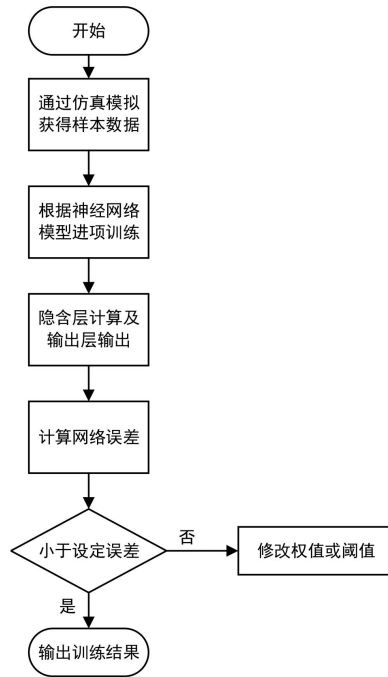


图 6-1 BP 神经网络结合仿真模拟训练流程

6.2 试验样本的选取

本文根据上面分析的几种预测模具磨损量的方法，采用 BP 神经网络的人工智能算法来预测模具磨损量，利用人工智能算法可以实现输入层到输出层的任何非线性关系，通过建立某种特殊的线性关系表达输入层到输出层的某种特殊的抽象关系，并且预测精度更高，更有利于模具优化。

本文从第五章中每个工艺参数的四个水平中选取较优的三个水平作为训练的样本，从信噪比试验可以得到每个工艺参数的较优的三个水平，如下表所示：

表 6-1 BP 神经网络训练样本

因素	水平 1	水平 2	水平 3
摩擦系数	0.13	0.14	0.15
冲压速度/ ($mm \cdot s^{-1}$)	10	20	30
模具硬度/HRC	58	61	64
模具间隙/mm	0.7	0.77	0.84

利用表 6-1 中的所有水平进行全面试验，得到 81 组试验数据，如附录 I 中所示。

6.3 BP 神经网络的搭建

BP 神经网络由输入层、输出层和隐含层组成，各层由多个结点组成，各结点的连接状态用权值表示^[87]。因为搭建的 BP 神经网络模型可以作为一个复杂的非线性预测模型，利用 BP 神经网络模型来预测模具磨损量，可以提高预测精度。

6.3.1 输入层与输出层的确定

本文将四个试验因素即摩擦系数，冲压速度，模具硬度，模具间隙作为输入层，输出层即为模具磨损量，所以输入层的节点数为 4，输出层的节点数为 1。

6.3.2 隐含层节点数与激活函数的选取

隐含层中的结点数目过少会引起不充分的拟合，反之，过度使用神经元也会引起某些问题。首先，隐含层中的神经元数量过多会造成过度学习，在神经网络的节点数目太多的情况下，训练集所能容纳的信息不能满足隐层全部神经元的要求，容易出现过拟合问题。虽然训练样本中含有充足的信息，但由于隐含层中的神经元数目过多，导致训练过程耗时过长，很难取得理想的结果。因此，如何选取适当的隐藏层神经元数目就显得尤为重要^[88]。为了得到逼近能力更强的隐含层节点数，采用公式（6-1）计算隐含层节点数^[89]。

$$m = \sqrt{n + l} + \alpha \quad (6-1)$$

通过公式计算得到的隐含层节点数往往只是一个初值的估算，对于神经网络模型的训练精度并没有达到最好效果，只是一个粗略的估算，本章的输入层节点数为 4，输出层节点数为 1， α 的值取 10，计算得到的隐含层节点数的初值是 13，把这个值作为初始值对神经网络模型进行性能测试，通过不断地增加隐含层节点数量，获得了相应于不同节点数目的训练中的均方误差。

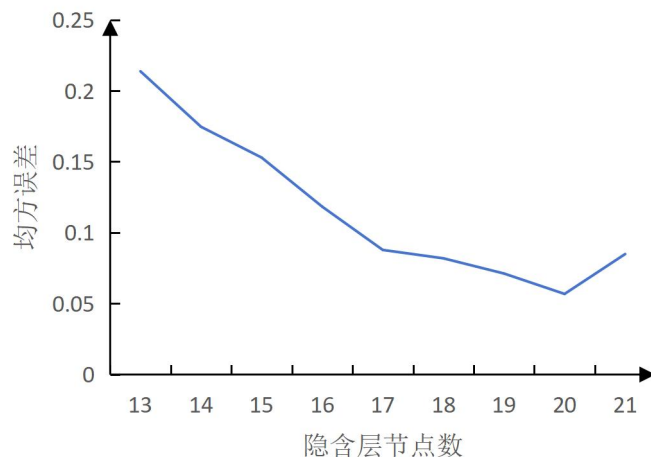
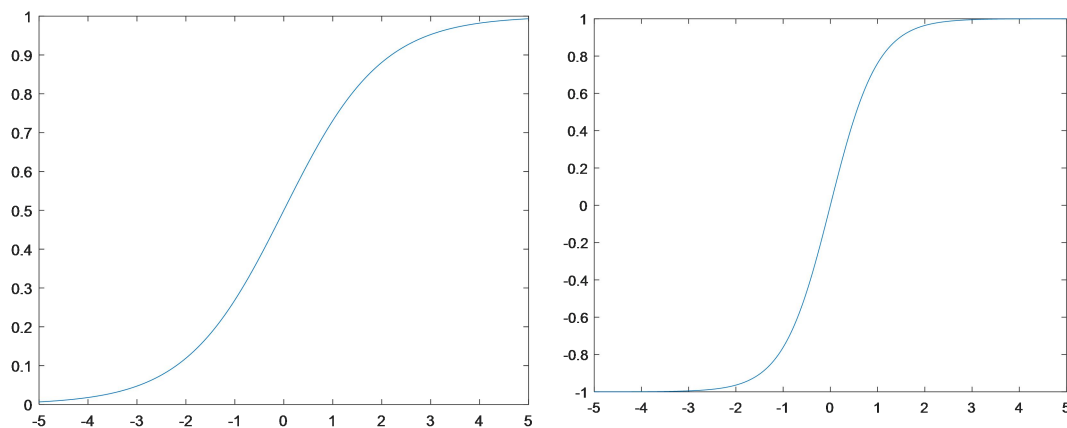


图 6-2 均方误差随隐含层节点数变化图

图 6-2 显示在隐含层节点数目从 13 到 21 个顺序递增时，其均方误差呈先降低后上升的趋势，在隐含层节点数目为 20 个时，均方误差最小，所以搭建的 BP 神经网络的隐含层节点数确定为 20。

BP 神经网络有多种不同的激励函数，在其隐含层中经常采用 S 型激励函数，其几何形态为 S 型曲线如图 6-3 所示，具有连续的性质容易求导。常用的激活函数有两种类型，分别是图 6-3 (a) 的 Log-sigmoid 类型和图 6-3 (b) 的 tan-sigmoid 类型。Log-sigmoid 类型激活函数，其输入可以是任何数值，其输出是 0 到 1；tan-sigmoid 类型激活函数^[90]，其输入值可以是任何数值，其输出是 -1 到 +1 之间。



(a) Log-sigmoid 类型的激活函数

(b) tan-sigmoid 类型的激活函数

图 6-3 S 型激励函数

Log-sigmoid 型激活函数的公式为 $\text{logsig}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ ，取值区间是 (0, 1)，

tan-sigmoid 型激活函数的公式为 $\text{tansig}(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} - 1$ ，取值区间是 (-1, 1)^[91]。

这里采用 tan-sigmoid 型激活函数来表示 BP 神经网络的模型从输入层到隐含层，在多隐含层的情况下，每层的输出就是下层的输入仍然是 $(-1, 1)$ ，这样每层的输入范围都是统一的，且都是有效利用激活函数活跃区间的。

而从隐含层到输出层经常选取如图 6-4 所示的 purelin 激活函数，在神经网络中，Purelin 函数通常被用作输出层的激活函数。这是因为在许多情况下，我们需要将神经网络产生的连续数值映射到某个范围内。例如，在回归问题中，我们需要将神经网络产生的实数映射到某个范围内，并计算其误差；在分类问题中，我们需要将神经网络产生的实数映射到 $[0,1]$ 之间，并根据阈值判断其分类结果。线性激活函数 purelin 的公式为 $y=x$ ，本文选择模具磨损量作为输出层，它从隐含层的输出可以直接映射到输出值上，并且它没有上下界的限制，所以数据的输出有较大的调控范围。

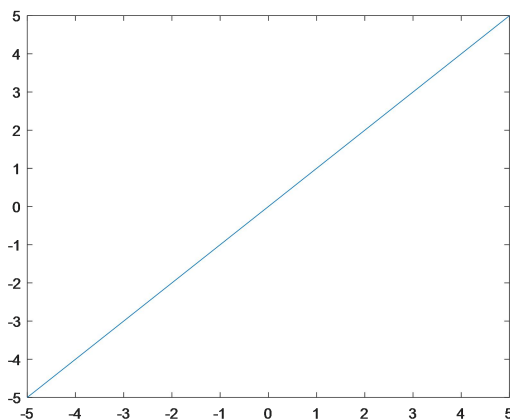


图 6-4 purelin 型激活函数

6.3.3 神经网络训练的算法

在神经网络的训练算法方面，这里选取 MATLAB 神经网络自带的工具箱里面的常用的 Levenberg—Marquardt 训练算法。

6.3.4 创建模具磨损量的 BP 神经网络模型

选取上一章节中的摩擦系数，冲压速度，模具硬度，模具间隙四个试验因素作为输入层，节点数为 4，模具磨损量作为输出层，节点数为 1，隐含层节点数为 20，通过对全面试验的 81 组数据进行分解，训练样本比例为 70%、验证样本比例为 15%，测试样本比例为 15%，建立一个 BP 神经网络的预测模型，结构如

图 6-5 所示。

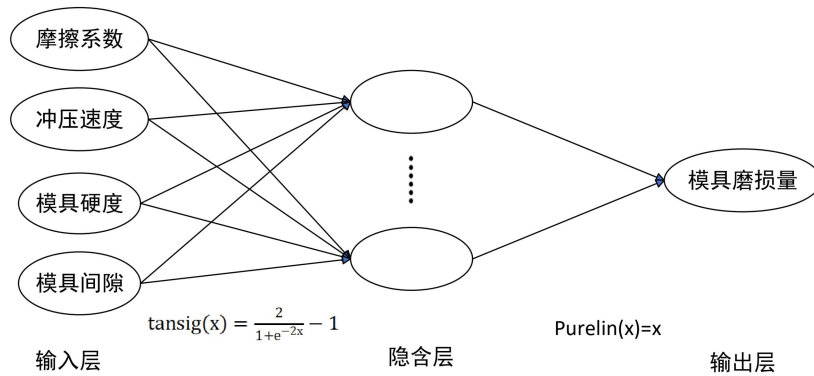


图 6-5 BP 神经网络的预测模型结构图

6.3.5 BP 神经网络的验证

在 MATLAB 中利用软件的工具箱来模拟预测模型的训练,训练效果如图 6-6 所示,当经过 26 次迭代之后训练停止,训练后的均方误差为 0.0462。

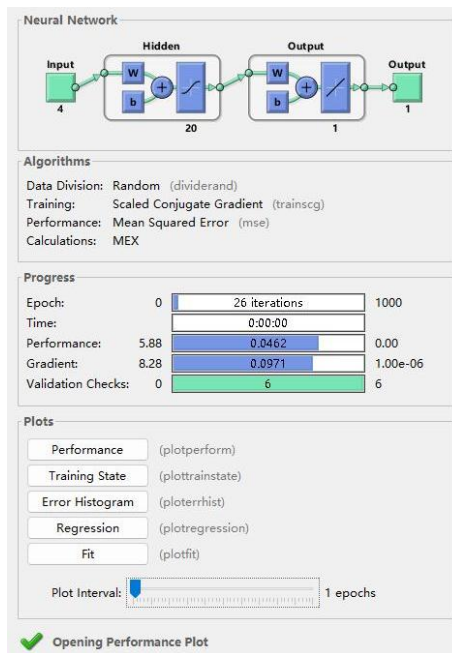


图 6-6 训练后的均方误差图

通过 BP 神经网络训练曲线图 6-7 可得到,当迭代到第 20 代时,验证的性能达到最优状态,此时的验证集均方误差为 0.072184,后面的第 21 代到 26 代过程中,验证集和测试集几乎保持一致不变,训练集几乎缓慢下降并几乎保持稳定,此时认为该 BP 神经网络训练完成且未出现早熟或过拟合现象。

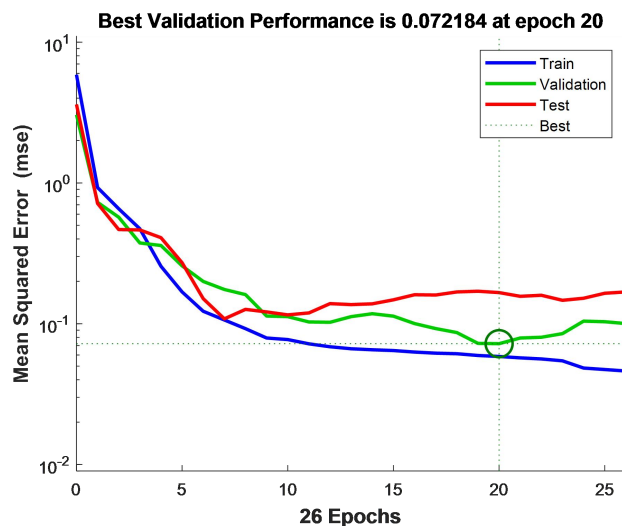


图 6-7 BP 神经网络训练曲线图

通过如图 6-8 所示的 BP 神经网络拟合度曲线图可以看出该神经网络训练集的拟合回归 R 值为 0.92839，验证集的拟合回归 R 值为 0.83645，测试集的拟合回归 R 值为 0.87641，综合拟合回归 R 值为 0.9069，通过 BP 神经网络预测值和真实值的比较，发现 BP 神经网络的预测值和真实值之间的误差还是相对较大，有待进一步优化。

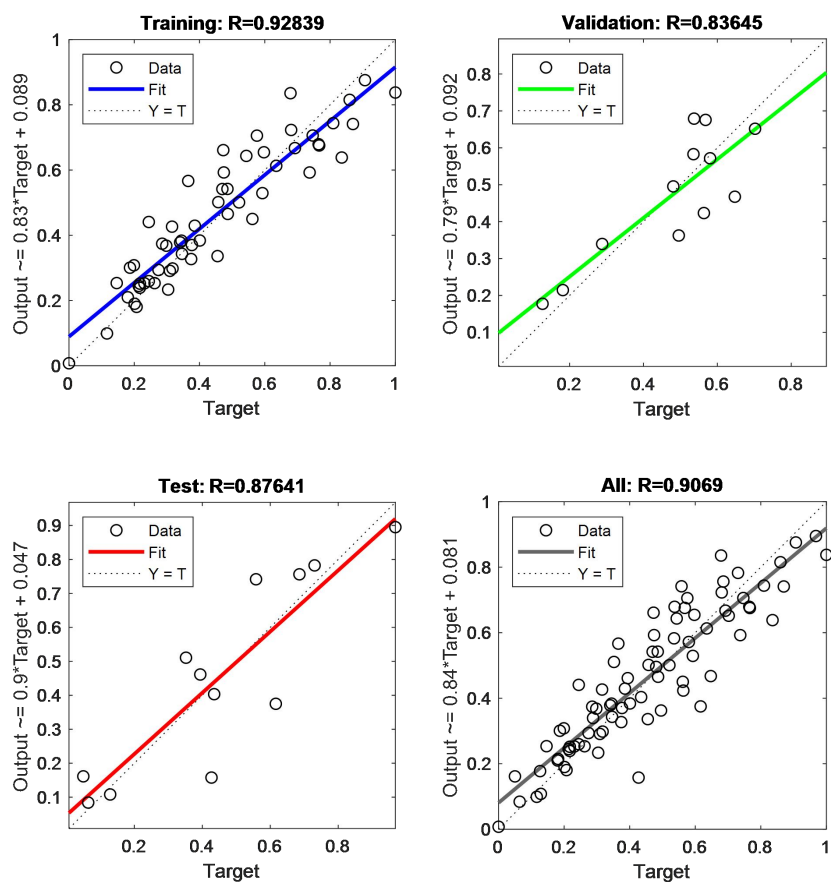


图 6-8 BP 神经网络拟合度曲线图

6.4 FA-BP 神经网络的搭建及验证

BP 神经网络在搭建过程中, 会随机形成初始权重 ω_i 和阈值 θ , 利用样本误差调整神经网络权重和阈值, 通过拟合逼近优化网络结构, 进而实现精准的数据拟合预测, 提升模型性能^[92]。传统方法存在不稳定性 and 逼近程度低的问题, 导致 BP 神经网络预测能力受限。为提升预测精度, 本文引入萤火虫算法对 BP 神经网络进行优化, 形成 FA-BP 神经网络模型。优化后的模型预测精度更高, 性能更优, 为解决相关问题提供了新途径。

6.4.1 萤火虫算法概括

萤火虫算法是一种启发式优化算法, 其主要思想是模拟萤火虫在交配时的行为, 通过随机移动和亮度吸引等策略来优化目标函数值^[93~96]。

式 (6-2) 是算法初始化。

$$x_{ij}^{(0)} = U(0, 1) \cdot (ub_j - lb_j) + lb_j \quad (6-2)$$

式中, $U(0, 1)$ —从区间 $[0, 1]$ 中的均匀分布得出的随机数。

萤火虫的相对亮度如式 (6-3)。

$$I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}} \quad (6-3)$$

式中, I_0 —萤火虫的初始吸引度;

γ —光吸收参数;

r_{ij} —位置 i 与位置 j 之间的距离。

两个萤火虫之间的距离计算如式 (6-4)。

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^D x_{ik} - x_{jk}} \quad (6-4)$$

萤火虫从 i 点到另一个更吸引的 j 点的最佳位置迭代式如 (6-5) 所示:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta_0 + e^{-\gamma_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha(rand - 0.5) \quad (6-5)$$

式中, α —步长因子;

最亮的萤火虫的位置修正式 (6-6) 如下:

$$xbest_i(t+1) = xbest_i(t) + \alpha(rand - 0.5) \quad (6-6)$$

FA—BP 算法的适应度函数如下:

$$f_{fit} = \sqrt{\frac{1}{N}(\sum_i^N (h_i - h_m)^2)} \quad (6-7)$$

式中, h_i —所有第 i 个训练向量的实际输出值;

h_m —所有训练向量的预测值;

N —训练的个数。

在此基础上,进行了萤火虫优化 BP 神经网络的算法的优化,如图 6-9 所示,左边是萤火虫优化 BP 神经网络算法的流程,右边是利用 FA-BP 算法优化模具磨损量的流程。

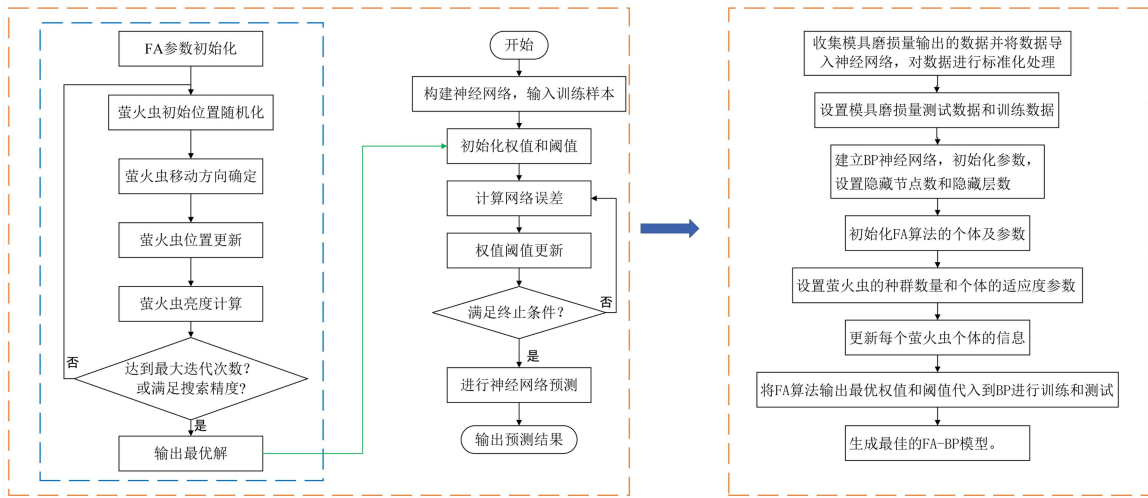


图 6-9 萤火虫优化算法示意图

6.4.2 FA-BP 神经网络的搭建与验证

将选取的试验样本分别作为训练集, 测试集和验证集, 通过对 FA-BP 神经网络的训练得到了 FA-BP 神经网络训练曲线图 6-10, 可以看到, 在第 15 次迭代中, 检验性能是最优的, 验证集的均方误差是 0.036231。第 16 代以后, 验证集和测试集几乎保持一致不变, 训练集几乎缓慢下降并几乎保持稳定。

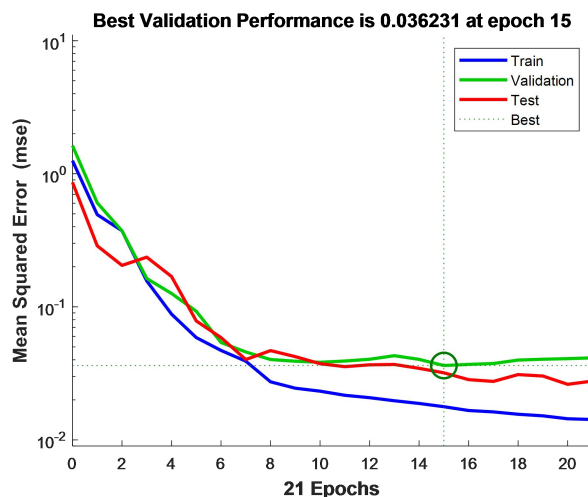


图 6-10 FA-BP 神经网络训练曲线图

通过 FA-BP 神经网络拟合度曲线图 6-11 可以得到, FA 对 BP 神经网络的优化, 神经网络的整体模型的优化效果得到提升, 仅仅经过 15 次迭代, 验证集性能就达到最佳, 神经网络的训练就已经完成, 综合回归 R 值提升为 0.97427, 相比较 BP 神经网络模型, 优化效果更明显。

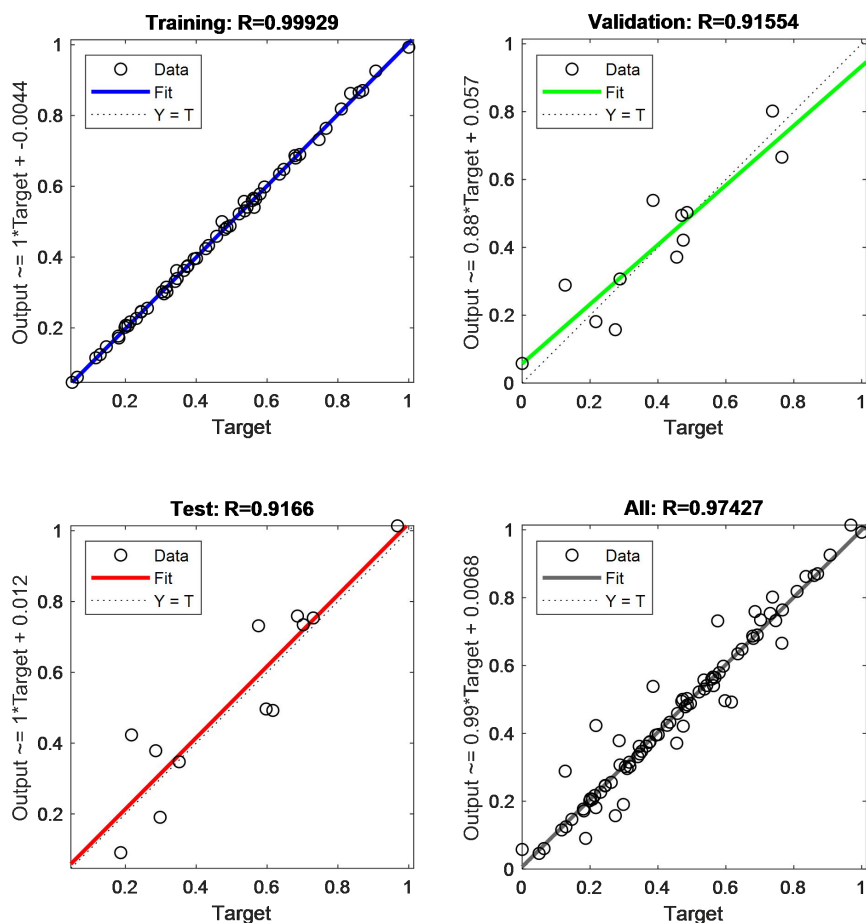


图 6-11 FA-BP 神经网络拟合度曲线图

将萤火虫算法优化 BP 神经网络前后的预测值与实际值进行了对比，如图 6-12 和图 6-13 所示，表明 FA-BP 神经网络的预测精度高于传统的 BP 神经网络，并且误差变化幅度较小，具有较好的稳定性。

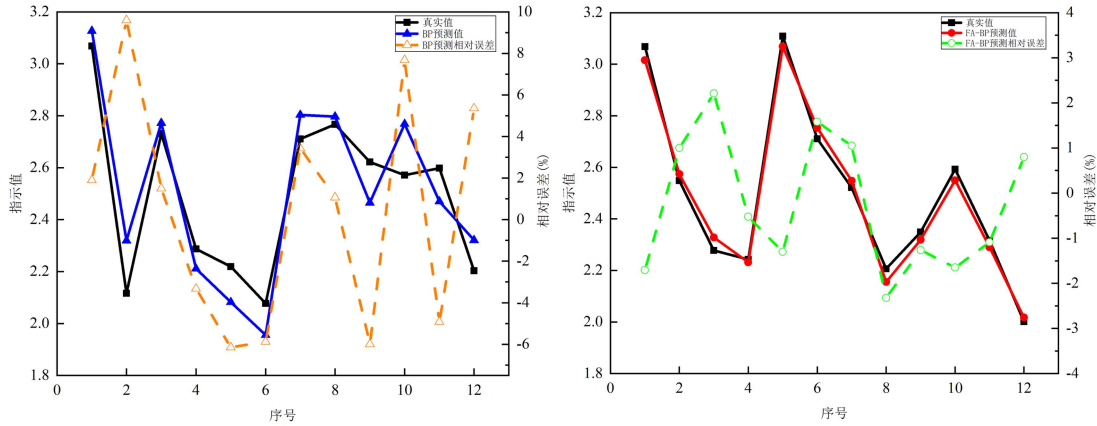


图 6-12 BP 神经网络预测值与实际值对比图 图 6-13 FA-BP 神经网络预测值与实际值对比图

经过上面的对比，采用萤火虫算法优化后的 BP 神经网络具有训练速度更快，均方误差更小，综合回归 R 值更大，拟合精度更高的优点，所以利用萤火虫算法优化后的 BP 神经网络进行工艺参数优化具有更好的效果。

通过比较发现，FA—BP 神经网络的训练速度更快、均方误差更小、综合回归 R 更大、拟合精度更高，因此在工艺参数优化中应用 FA—BP 神经网络可以取得更好的效果。

6.5 基于模具磨损量最小的 FA-BP 神经网络的工艺参数优化

通过萤火虫算法优化后的 BP 神经网络，将已经搭建完成的神经网络作为适应度函数，以模具磨损量在全局的最小值作为目标值，摩擦系数，冲压速度，模具硬度，模具间隙作为自变量，其约束条件为 $x_1 \in (0.13, 0.15)$ ， $x_2 \in (10, 30)$ ， $x_3 \in (58, 64)$ ， $x_4 \in (0.7, 0.84)$ 。

该算法以最小的适应值为函数，以最小的适应值为优化目标，对 FA-BP 神经网络进行迭代优化。利用 MATLAB 对 FA-BP 算法进行计算，得出了目标函数最佳适应度随时间的变化规律如图 6-14，此优化过程共进行 50 次迭代，当迭代到第 19 代时适应度趋于稳定，此时适应度曲线已收敛，适应度值达到最小，模型能够成功对工艺参数完成寻优。

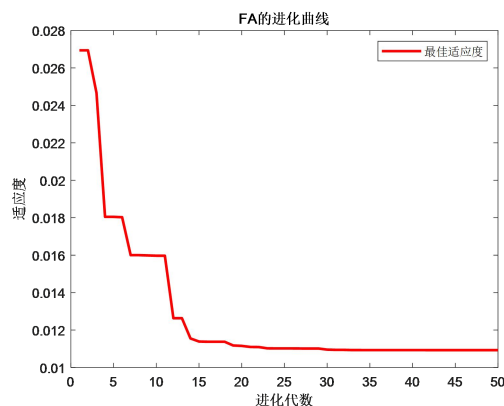


图 6-14 目标函数最佳适应度随时间的变化规律图

FA-BP 在 19 次迭代后，适应度值最小，此时对应的成形工艺参数为摩擦系数为 0.15，冲压速度为 26.66mm/s，模具硬度为 63.76HRC，模具间隙为 0.7719mm。在 Deform 中对该组工艺参数进行数值模拟，得到如图 6-15 所示模具磨损量为 $1.57929730 \times 10^{-6}$ mm。

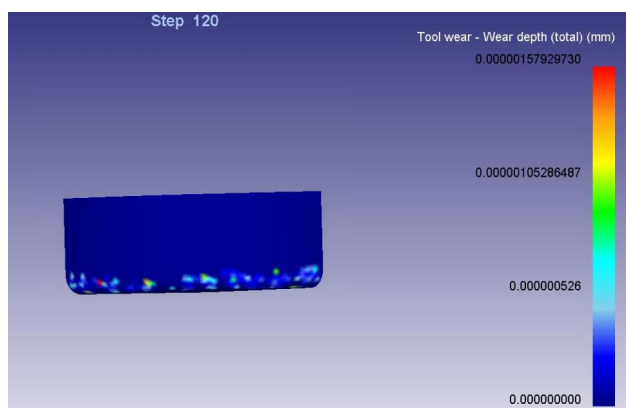


图 6-15 FA-BP 神经网络预测下的凸模拉延过程仿真模拟磨损量云图

通过 FA-BP 算法进行模具磨损量的优化后，把最初的模具磨损量，信噪比优化，分别与它进行对比如表 6-2 所示，得到模具磨损量由最初的 $2.96775215 \times 10^{-6}$ mm 下降至 $1.57929730 \times 10^{-6}$ mm，表明 FA-BP 算法优化效果十分明显，提高了模具的使用寿命。

表 6-2 FA-BP 算法优化前后模具磨损量对比表

优化方法	工艺参数				仿真结果
	摩擦系数	冲压速度 / $(mm \cdot s^{-1})$	模具硬度/HRC	模具间隙/mm	磨损量 ($\times 10^{-6}mm$)
无优化方法	0.12	10	55	0.7	2.96775215
信噪比优化	0.15	30	64	0.77	1.85458237
FA-BP 优化	0.15	26.66	63.76	0.78	1.57929730

6.6 本章小结

本章从上一章节中每个工艺参数的四个水平中选取较优的三个水平作为训练的样本，把四个工艺参数作为输入，磨损量作为输出，搭建四输入一输出的 BP 神经网络，并运用萤火虫算法优化模型，可确定最优工艺参数组合，使模具磨损量降至最低，提升生产效率与产品质量。

(1) 从第五章中每个工艺参数的四个水平中选取较优的三个水平作为训练的样本，完成了 81 组试验数据的全面试验。

(2) 建立了以摩擦系数、冲压速度、模具硬度和模具间隙为输入量，模具磨损量为输出量的三层 BP 神经网络模型，在训练与验证 BP 神经网络模型的过程中，发现其存在误差。为提升预测精度，本文利用萤火虫算法对 BP 神经网络的权值和阈值进行优化，成功构建了预测精度更高的 FA-BP 神经网络，显著提升了模型的性能。

(3) 提出了轿车后车门内板模具磨损量最小的萤火虫优化 BP 神经网络成形工艺参数优化方法。利用训练及验证过后的 FA-BP 神经网络预测模具的最小磨损量，FA-BP 神经网络在 19 次迭代后，适应度值最小，此时对应的成形工艺参数为摩擦系数为 0.15，冲压速度为 26.66mm/s，模具硬度为 63.76HRC，模具间隙为 0.7719mm。将这组工艺参数组合输入到 Deform-3D 中进行数值仿真模拟，得到模具磨损量为 $1.57929730 \times 10^{-6}$ mm，大大减少了模具的磨损，优化效果明显。

第 7 章 总结与展望

7.1 总结

伴随着轿车行业的不断发展壮大，汽车覆盖件的生产也日益剧增，不同的覆盖件的生产公司也在不断提高生产水平，提升生产效率，力争生产出质量更高，成形效果更优的零件。同时汽车覆盖件的生产离不开模具制造业的发展，成形效果较优的零件离不开质量完好的模具，所以许许多多的模具公司希望减小模具的磨损量，延长模具的使用寿命。本文以轿车后车门内板为研究对象，分析了零件的结构，设计了轿车后车门内板的拉延模具，分别运用软件完成了零件拉延成形的仿真模拟和模具拉延过程中表面磨损的仿真模拟，得到了最优工艺参数组合，使零件的成形质量良好，模具的磨损量降到最低。

本文主要的研究工作及取得的主要成果如下：

（1）基于 CATIA 软件设计了轿车后车门内板的结构，零件的形状不规则，内部曲面较为复杂分析得到了零件冲压成形的加工工艺路线，确定了拉延过程中板料的主要参数及工艺的简单计算过程，基于 UG 软件设计了轿车后车门内板的拉延模具的整体结构，主要对凸模、凹模和压边圈三个部分进行了整体的分析与设计。

（2）利用 Autoform 软件先对零件进行预成形仿真模拟，发现初次仿真模拟成形出来的结果非常不好，成形缺陷较为明显，加入不同系数的几段拉延筋后，轿车后车门内板的成形极限图稍微得到改善，零件的最大减薄率和最大起皱率明显减小，成形效果得到提高，但是还需要进一步工艺参数优化，为后续优化奠定基础。

（3）选取模具间隙、摩擦系数和压边力为试验因素，最大减薄率和最大起皱率为评价指标进行 BBD 试验，建立了最大减薄率和最大起皱率的响应面模型，两个响应面的模型的拟合度较高，把两个目标函数转换成一个单目标函数的优化模型进行多目标寻优，得到了最优的工艺参数组合，最终经过检验发现零件的成形质量此时最优。

（4）简述了冲压模具的磨损理论和失效形式，基于 Deform-3D 软件对模具

的磨损进行仿真模拟，模具间隙、摩擦系数、冲压速度和模具硬度为试验因素，模具的磨损量为评价指标，进行正交试验，利用信噪比分析法得到了最优工艺参数组合，不同的试验因素对模具磨损量影响程度的大小。基于多元线性回归方程求得在设定工艺参数范围内的模具磨损经验公式，最后统计试验值与计算值的误差得到磨损经验公式的准确度。

(5) 选取了较优的正交试验的数据作为 BP 神经网络的训练的全面数据，搭建以四个工艺参数为输入，模具磨损量为输出的 BP 神经网络模型，再利用萤火虫算法优化神经网络结构的权值和阈值，建立了预测精度更高的 FA-BP 神经网络，利用 FA-BP 神经网络模型预测模具的最小磨损量，得到了全局的最优工艺参数组合，最后通过 Deform-3D 进行模拟仿真来验证，降低了模具的磨损量，提高了模具的使用寿命。

本文主要创新点如下：

(1) 提出了一个使制件的成形质量达到最佳状态的优化模型。建立了最大减薄率和最大起皱率的响应面模型，并对两个响应面模型分别进行了检验，发现拟合度较高，再把两个响应面模型转化成一个单目标函数，最终寻找到这个单目标函数的最优解，使零件的成形效果最佳。

(2) 建立了轿车后车门内板模具磨损量与工艺参数之间的经验公式。基于模具磨损的正交试验的数据，通过 SPSS 对试验数据进行分析，得到了关于模具磨损量的多元线性方程，对方程的系数进行求解并分析验证其显著性，最终建立了各个工艺参数与模具磨损量之间的经验公式。

(3) 提出了轿车后车门内板模具磨损量最小的萤火虫优化 BP 神经网络成形工艺参数优化方法。建立了以四个工艺参数为输入与模具磨损量为输出的 BP 神经网络，利用萤火虫算法对模型权重和阈值进行优化得到 FA-BP 神经网络模型，利用该模型得到最优工艺参数组合。

7.2 展望

本文虽然对轿车后车门内板冲压工艺参数优化机器模具寿命进行了研究，但是，由于本人学术不精，能力有限，在进行优化过程中仍然存在不足之处，本文的研究还需要进行改进，现提出以下几点是需要努力改进的地方：

(1) 研究工艺参数对模具磨损量的时候, 只考虑了模具间隙、摩擦系数、冲压速度和模具硬度为试验因素, 因此在后续的研究中还需要考虑加入更多的工艺参数, 探究对模具磨损的影响程度, 需要继续进行研究。

(2) 无论是对成形质量的优化还是对模具磨损量的优化, 都只是借助仿真软件进行模拟仿真, 没有利用真实的零件和模具进行实验探究, 因此在后续的研究中希望考虑可以在工厂做实验来验证仿真的真实性。

参考文献

- [1] 卓芳.大型汽车覆盖件成形参数优化及模具结构优化设计研究[D].重庆大学,2016.
- [2] 覃柏英,秦文东,林贤坤等.基于 BBD 设计和响应面法的隔热罩冲压成形工艺参数优化[J].制造业自动化,2015, 37 (15):57-60.
- [3] 后洁琼,卢卫宁,臧佳克等.阳极板生产过程中如何提高模具使用寿命[J].化工管理,2020,(11):186-187.
- [4] 苏传义,邵伟彬,任闯等.冲压成形 CAE 技术的现状与发展[J].锻造与冲压,2020,(22):34-38.
- [5] Dunshui J. Research on Key Processes of Plastic Stamping and Forming Machinery Manufacturing Based on CAD Technology[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 769 (4), 042079.
- [6] 张蒙.混合表面等离子体回音壁模式微腔模式特征分析[D].浙江师范大学,2016.
- [7] 贾磊.浅谈覆盖件的冲压成型 CAE 分析技术[J].装备制造技术,2012,(03):201-202、205.
- [8] 汤云翔.汽车大型外覆盖件冲压拉伸成形仿真与冲压工艺参数优化技术研究[D].浙江大学,2022.
- [9] 徐丁旺.高强钢汽车结构件冲压成形及回弹控制研究[D].江苏大学,2019.
- [10] G. M L, C. K, J. E P, et al. Advances in Sheet Forming—Materials Modeling, Numerical Simulation, and Press Technologies[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133 (6):061001.
- [11] Chen Y, Lee W B, Nakamachi E. Crystallographic homogenization finite element method and its application on simulation of evolution of plastic deformation induced texture[J]. Acta Mechanica Sinica, 2010, 23(1): 36-48.
- [12] 柳玉起,杜亭,章志兵.板料冲压成形快速分析软件 FASTAMP[J].材料科学与工艺,2004(04):353-356.
- [13] 许恒建.多工位级进模成形仿真算法研究与系统集成[D].华中科技大学,2012.
- [14] 宋灏.汽车背门内板冲压成形与回弹的数值模拟研究[D].天津理工大学,2015.
- [15] 李晔.汽车覆盖件冲压成形稳健性设计与模具型面补偿及其应用研究[D].浙江大学,2020.
- [16] Oujebbour F, Habbal A, Ellaia R. Optimization of stamping process parameters to predict and reduce springback and failure criterion[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,

2015, 51 (2): 495-514.

- [17] Badgujar Y T, Wani P V. Stamping Process Parameter Optimization with Multiple Regression Analysis Approach [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5 (2): 4498-4507.
- [18] Ahlam S, Rachid M, Ali B, et al. Enhanced Daily Global Solar Radiation Prediction Through Hybrid Artificial Neural Network and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System with Meta-Heuristic Algorithm Integration[J]. Instrumentation Measure Métrologie, 2023, 22 (6):241-251.
- [19] Lou S, Wang Y, Lu S, et al. Extrusion Process Parameters Optimization for the Aluminum Profile Extrusion of an Upper Beam on the Train Based on Response Surface Methodology[J]. CIRP Annals, 2016, 16 (3): 551-557.
- [20] Huang D M, Li C, Fu L, et al. Stamping Parameters Optimization of an AA5754 A-pillar by Response Surface Methodology[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1063 (1): 012187-012187.
- [21] Iqbal M U, Kumar S V, Gopalakannan S. Application of Response Surface Methodology in optimizing the process parameters of Twist Extrusion process for AA6061-T6 aluminum alloy[J]. Measurement, 2016, 94 126-138.
- [22] 孙兆妹.AZ31 镁合金连续变截面挤扭成形工艺的数值模拟研究[D].哈尔滨理工大学,2019.
- [23] Trzepieciniski T, Lemu G H. Finite element method-based modeling of bending under tension friction test of deep drawing quality steel sheets[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 504 (1): 012068.
- [24] 童圆栖.基于数值模拟的展开轮表面微结构参数化设计[D].哈尔滨理工大学,2021.
- [25] Lee I, Joeng M, Lee S, et al. Prediction of punch life in notching process for automatic transmission retainer considering fatigue and wear[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29 (12): 5387-5393.
- [26] Naranje V, Kumar S, Kashid S, et al. Prediction of life of deep drawing die using artificial neural network[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2016, 2 (1): 132-142.
- [27] Lei G, Lei L, Haihong H. Digital Twin-Driven Sheet Metal Forming: Modeling and Application for Stamping Considering Mold Wear[J]. J. Manuf. Sci. Eng., 2022, 144 (12):121003.

- [28] Xuewen Z, Ying Z, Zhiying C, et al. Die wear analysis and pre-forging process optimization of hot forging for automobile flange fork[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126 (3-4): 1701-1716.
- [29] 李禧,张莹,陈志英等.5CrMnMo 模具钢销盘磨损试验及仿真验证[J].模具工业,2021,47(08): 67-70.
- [30] Yaonan C, Xiaoyu G, Yingbo J, et al. A new method based on a WOA-optimized support vector machine to predict the tool wear[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121 (9-10): 6439-6452.
- [31] 赵明利,袁一鸣,宋士杰等.基于特征选择和模糊支持向量机的刀具磨损状态识别[J].制造技术与机床,2020,(11):115-120.
- [32] 张本松.基于 Autoform 的汽车外腰线加强板冲压成形工艺分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2022,40(01):100-103、156.
- [33] 李倩.浅析汽车覆盖件的冲压工艺和实例分析[J].时代农机,2019,46 (01):62-64.
- [34] Liming D, Zhibo H, Dongying D, et al. Investigation on deformation characteristic of electromagnetic punching process in AA5182 aluminum alloy sheet[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128 (5-6): 2347-2363.
- [35] Qiang L, Sulin C, Bin S, et al. CVD diamond coated drawing dies: a review[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36 (4): 381-408.
- [36] 房宇飞,宁世儒,苏建军等.基于结构-工艺协同优化的车门外板冲压成形[J].精密成形工程,2019,11 (02):22-27.
- [37] 柯旭贵,张荣清.冲压工艺与模具设计[M].北京:机械工业出版社,2021:200-203.
- [38] Yanmin X, Kai F, Meiyu D, et al. Analysis and optimization of the stamping process with pretreated 7A09 aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128 (1-2): 669-683.
- [39] 林祖正.某型汽车覆盖件-发动机支撑罩拉延模设计[J].科技创新与应用,2014,(02):32-33.
- [40] 谢斌.逆向工程在汽车覆盖件成形技术上的应用[D].合肥工业大学,2005.
- [41] 梅自元.车身覆盖件冲压成形仿真分析与回弹预测[D].华东交通大学,2007.
- [42] 王树人.冲压模具设计方法与技巧[M].北京:化学工业出版社,2018:207-208.
- [43] Weian D, Chunxu L, Xiaokui X, et al. Pallet Stamping Die Design[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2402 (1): 012015.

- [44] Wang T J ,Shen Q M ,Xue T , et al. Numerical Simulation of Punching Bonding Based on AutoForm [J]. Advanced Materials Research, 2011, 1165 (189-193): 3423-3426.
- [45] 陶晨,王双.基于 Autoform 的汽车发动机罩板拉延成形仿真研究[J].农业装备与车辆工程,2018,56(02):69-72.
- [46] 任庆锐.基于 CAE 双动拉延成形对冲压成本影响的分析[J].模具技术,2018,(06):56-60.
- [47] Liu F X, Hu H Y, Huang J W. Research on Simulation Technology for Auto Panel in Drawing Forming Based on Autoform[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1335 (291-294): 259-262.
- [48] 唐凌霄,王玉勤,黄凯旋等.基于 DYNAFORM 的汽车车门成形模拟研究[J].巢湖学院学报,2013,15(03):92-97.
- [49] Li Q Y, Zhang M A. Wear Analysis of Warm Extrusion Dies Using DEFORM[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3172 (529-529): 630-635.
- [50] 周建勋,孙侃.冲压模具压边圈工艺改善与生产成本递减研究[J].天津科技,2021,48(07):120-122.
- [51] 董金龙.关于薄壁管状零件加工工装优化技术的研究[J].科技创新与应用,2020,(26):98-101.
- [52] 汪雪晴.不等截面拉延筋结构参数反求研究与应用[D].湖南大学,2011.
- [53] E. T ,R. K ,N.G. A . Prediction of Sheet Drawing Characteristics with Square Drawbead Elements Using Response Surface Methodology [J]. Acta Physica Polonica A, 2015, 128 (2B): 344-347.
- [54] 黄志强,李峰,王耀强等.基于响应面法的透水混凝土配合比优化设计[J].沈阳工业大学学报,2023,45(05):587-593.
- [55] Wang H, Li E, Guang L Y. Optimization of drawbead design in sheet metal forming based on intelligent sampling by using response surface methodology[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2007, 206 (1): 45-55.
- [56] Qingyu Z, Qingkai H, Jinguo L, et al. High-Accuracy Finite Element Model Updating a Framed Structure Based on Response Surface Method and Partition Modification[J]. Aerospace, 2023, 10 (1): 79-79.
- [57] 蒋磊,王龙,李十全等.基于正交试验的侧围外板拉延成形工艺参数优化研究[J].汽车工艺与材料,2021,(09):42-50.

- [58] 姚娟. 冷冲压复合模具的工艺设计及装配研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(11): 144-147.
- [59] 韩娟娟. 基于强塑积指标的车身用高强度钢板温成形性能研究[D]. 江苏大学, 2013.
- [60] Kaijia J, Junhao W, Zhongquan C, et al. Influence of coupling factors on structural reliability based on polynomial response surface optimization model[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2023, 15 (8).
- [61] Mustafa Y, Taha T, Tansel Y İ. Development of a Goal Programming Model Based on Response Surface and Analytic Hierarchy Process Approaches for Laser Cutting Process Optimization of St-52 Steel Plates[J]. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 2022, 21 (02): 293-316.
- [62] 林启豪, 陈其生, 王艳苹. 汽车覆盖件铝代钢轻量化设计及冲压成形质量控制[J]. 太原学院学报(自然科学版), 2023, 41(02): 39-44.
- [63] Junho B, Minki K, Gi Hyun B, et al. Quantitative Evaluation of Tool Wear in Cold Stamping of Ultra-High-Strength Steel Sheets[J]. *Metals and Materials International*, 2022, 29 (2): 327-342.
- [64] T T, G H L. FEM-based assessment of wear of stamping die[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 526, 012002-012002.
- [65] 何芳. 冶金机械轴承和齿轮失效分析[J]. 世界有色金属, 2019, (06): 59、61.
- [66] 王全民. 冲压模具寿命的分析及提高[J]. 机电工程技术, 2020, 49(01): 134-136.
- [67] Leilei Z, Kecheng Z, Ding T, et al. Experimental and Numerical Study on Friction and Wear Performance of Hot Extrusion Die Materials[J]. *Materials*, 2022, 15 (5): 1798-1798.
- [68] C, Yu. K, E. R. CAE Modeling of Hot Stamping Tool Wear[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2021, 346: 01041.
- [69] Takashi U, Takashi I, Shinichi E. FEM Analysis of Punching-Process in Consideration of Micro Die Wear[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 80, 15006.
- [70] 李丁丁. 旋流分离器的流场分析与结构优化[D]. 太原理工大学, 2020.
- [71] 王宇. 中厚板差温轧制工艺研究与应用[D]. 东北大学, 2017.
- [72] 白西平. 精密垫圈落料冲孔复合模加工及装配[J]. 热加工工艺, 2012, 41(17): 211-213.
- [73] 薛明明, 董海, 张鹏等. 涂层 PCBN 刀具切削淬硬钢磨损试验研究[J]. 工具技术, 2021, 55(06): 43-47.

- [74] 马在姣,薛森.提高冲压模具寿命的有效途径[J].江汉石油职工大学学报,2008,(04):94-96.
- [75] 曹军,姜文全,汪洪明.森林单轨运输车故障状态下的制动安全性分析及对策研究[J].林业机械与木工设备,2011,39(07):28-30.
- [76] 栗明.高强度钢II形件回弹的数值模拟研究[D].天津科技大学,2015.
- [77] Wang G L, Sun P X, Huang Y. Uniform Wearing Optimum Design of Extrusion Die Profile[J]. Key Engineering Materials, 2007, 84 (353-358): 2695-2698.
- [78] Li T, Zhao G, Zhang C, et al. Effect of Process Parameters on Die Wear Behavior of Aluminum Alloy Rod Extrusion[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28 (3): 312-318.
- [79] Ahsan R, Hella A, Muhammad H, et al. Using the Taguchi experimental design for assessing within-field variability of surface run-off and soil erosion risk[J]. The Science of the total environment, 2022, 828, 154567-154567.
- [80] 潘树林,杨连刚,秦子雨等.克西霍夫积分法微震成像精度影响因素分析[C].中国地球物理学会.中国地球科学联合学术年会论文集(21).成都:西南石油大学.2015:4.
- [81] 朱俊杰,黄文汉,张秋容等.基于 Grey-Taguchi 方法的汽车内置储物盒注塑工艺参数多目标优化[J].塑料科技,2019,47(04):63-68.
- [82] 赵玉津,张慧敏,罗震等.铝/钛超声波金属焊接参数的工艺优化[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(05):540-544.
- [83] 王建龙,张雯琼,郑永锋等.电代油钻井经济性评价与应用研究[J].油气田地面工程,2020,39(06):52-55.
- [84] Vamplew P, Dazeley R, Berry A, et al. Empirical evaluation methods for multiobjective reinforcement learning algorithms[J]. Machine Learning, 2011, 84 (1-2): 51-80.
- [85] Chernets' V M, Zhydyk B V, Chernets' M Y. Accuracy of Evaluation of the Service Life of a Plain Bearing According to the Generalized Cumulative Model of Wear[J]. Materials Science, 2014, 50 (1): 39-45.
- [86] Yanmin X, Wei L, Cheng L, et al. Optimization of Stamping Process Parameters Based on Improved GA-BP Neural Network Model[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2023, 24 (7): 1129-1145.
- [87] 朱建柳.基于 BP 神经网络技术在混合动力电动汽车故障诊断专家系统中的应用分析[J].大众汽车,2015(2).

- [88] 刘永德.基于人工智能的教学评价管理模型构建[J].教学与管理,2023,(13):67-70.
- [89] 罗根华,马云东,鞠中兰等.BP 神经网络模型在煤尘润湿性研究中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(06):593-597.
- [90] 焦敬品,李勇强,吴斌等.基于 BP 神经网络的管道泄漏声信号识别方法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(11):2588-2596.
- [91] 曾成,程志毅,郭庆等.人工神经网络在弹簧设计中的应用[J].湖北工学院学报,2004,(03):15-16、27.
- [92] 毛振宇,李方利,叶玉明等.基于 BP 神经网络算法的电缆局部放电类型模式识别[J].机电信息,2019,(27):20-22.
- [93] 刘纲,陈奇,雷振博等.基于改进萤火虫算法的有限元模型修正[J].工程力学,2022,39(07):1-9.
- [94] S. J, K. P, C. K, et al. A novel solution for the optimal reactive power dispatch problem using an artificial neural network integrated with the firefly optimization algorithm[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11,1-16.
- [95] 江雨燕,刘昊.基于 Pearson 系数和萤火虫算法优化 BP 神经网络的住宅价格预测模型[J].南阳理工学院学报,2023,15(02):1-6、24.
- [96] Nabila N P W, Nasir M S, Sazli M S, et al. Optimization of warpage on battery cover for hair clipper plastic part using response surface methodology (RSM) and firefly algorithm method (FA)[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2129 (1): 020201.

附录I 全面仿真试验数据表

序号	A	B ($mm \cdot s^{-1}$)	C (HRC)	D (mm)	磨损量 ($\times 10^{-6}mm$)
1	0.13	10	58	0.7	3.06852462
2	0.13	10	58	0.77	2.54839688
3	0.13	10	58	0.84	2.57663419
4	0.13	10	61	0.7	2.78759285
5	0.13	10	61	0.77	2.30389878
6	0.13	10	61	0.84	2.32942693
7	0.13	10	64	0.7	2.77572690
8	0.13	10	64	0.77	2.09297036
9	0.13	10	64	0.84	2.11616157
10	0.13	20	58	0.7	2.99087765
11	0.13	20	58	0.77	2.93122821
12	0.13	20	58	0.84	2.64604137
13	0.13	20	61	0.7	2.70392707
14	0.13	20	61	0.77	2.81285975
15	0.13	20	61	0.84	2.39217479
16	0.13	20	64	0.7	2.45637511
17	0.13	20	64	0.77	2.55533473
18	0.13	20	64	0.84	2.17316483
19	0.13	30	58	0.7	2.51947836
20	0.13	30	58	0.77	2.94404163
21	0.13	30	58	0.84	2.73108162
22	0.13	30	61	0.7	2.27775467
23	0.13	30	61	0.77	2.66158463
24	0.13	30	61	0.84	2.46905643
25	0.13	30	64	0.7	2.06922005
26	0.13	30	64	0.77	2.41790917
27	0.13	30	64	0.84	2.24300743
28	0.14	10	58	0.7	3.10895052
29	0.14	10	58	0.77	2.70139731
30	0.14	10	58	0.84	2.52973132
31	0.14	10	61	0.7	2.81067173
32	0.14	10	61	0.77	2.44221997
33	0.14	10	61	0.84	2.28702379
34	0.14	10	64	0.7	2.55334703
35	0.14	10	64	0.77	2.21862797
36	0.14	10	64	0.84	2.07764060
37	0.14	20	58	0.7	2.71036652
38	0.14	20	58	0.77	2.76700803
39	0.14	20	58	0.84	2.71852514
40	0.14	20	61	0.7	2.45032857

41	0.14	20	61	0.77	2.50153585
42	0.14	20	61	0.84	2.45770457
43	0.14	20	64	0.7	2.22599442
44	0.14	20	64	0.77	2.27251348
45	0.14	20	64	0.84	2.23269490
46	0.14	30	58	0.7	2.90056710
47	0.14	30	58	0.77	2.42086776
48	0.14	30	58	0.84	2.52161749
49	0.14	30	61	0.7	2.62228104
50	0.14	30	61	0.77	2.18860509
51	0.14	30	61	0.84	2.27968849
52	0.14	30	64	0.7	2.38220400
53	0.14	30	64	0.77	1.98823227
54	0.14	30	64	0.84	2.07097696
55	0.15	10	58	0.7	2.57093666
56	0.15	10	58	0.77	2.44017519
57	0.15	10	58	0.84	2.59811145
58	0.15	10	61	0.7	2.15077580
59	0.15	10	61	0.77	2.20605989
60	0.15	10	61	0.84	2.34884351
61	0.15	10	64	0.7	2.11148199
62	0.15	10	64	0.77	2.00408908
63	0.15	10	64	0.84	2.13380054
64	0.15	20	58	0.7	2.86737259
65	0.15	20	58	0.77	2.56106046
66	0.15	20	58	0.84	2.34035133
67	0.15	20	61	0.7	2.59227136
68	0.15	20	61	0.77	2.31534727
69	0.15	20	61	0.84	2.11581346
70	0.15	20	64	0.7	2.15070758
71	0.15	20	64	0.77	2.10337089
72	0.15	20	64	0.84	1.92210496
73	0.15	30	58	0.7	2.43660634
74	0.15	30	58	0.77	2.24108885
75	0.15	30	58	0.84	2.31808735
76	0.15	30	61	0.7	2.20283346
77	0.15	30	61	0.77	2.02607453
78	0.15	30	61	0.84	2.09568566
79	0.15	30	64	0.7	2.00115801
80	0.15	30	64	0.77	1.90381979
81	0.15	30	64	0.84	1.84058183

攻读硕士期间发表的学术成果

1. 论文发表情况

- [1] Guoqing Gong, Youmin Wang, Bin Zhou. Design and performance study of grease spool-less relief valve[J]. Scientific Reports, 2022, 12 (1): 16544-16544. (SCI)
- [2] Guoqing Gong, Youmin Wang, Kefan Yang. Design of Drawing Die for Rear Wheel Cover Outer Panel and Optimization of Wear Process Parameters[J]. Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers, 2023, 45(2): 129-143. (SCI)
- [3] Guoqing Gong, Youmin Wang, Peng Gong. Development of the airtightness experimental device for diving suit[J]. Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers, 2023. (SCI)

2. 专利发表情况

- [1] 宫国庆, 王幼民. 一种基于秸秆回收利用的粉碎装置: 中国, CN202210196961.9[P]. 2020.06.03 (发明专利实审)

3. 学科竞赛情况

- [1] 2022 年获“全国三维数字化创新设计大赛 14 周年精英联赛”“特等奖”
- [2] 2022 年获“挑战杯”全国大学生系列科技学术竞赛安徽省省赛“银奖”
- [3] 2022 年获第八届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛“银奖”“铜奖”
- [4] 2023 年获第九届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛“银奖”“铜奖”
- [5] 2021 年获安徽省大学生服务外包创新创业大赛“三等奖”
- [6] 2023 年获第十三届安徽工程大学百万大学生科普大赛“一等奖”
- [7] 2022 年获第十一届安徽工程大学合力杯大学生创意大赛“金奖”
- [8] 2023 年获第二届芜湖市机械学术论文“二等奖”

致谢

此时此刻，我的论文已经到了完稿之际，但是我的内心怅然若失。学海无涯，我将带着安徽工程大学的“尚德敏学，唯实惟新”的校训在我的人生道路上一直学习下去。我曾经欣喜若狂过，也曾愁眉不展过，喜怒哀乐都留在了这里，流金岁月恍如一梦。既有万般不舍，也有心怀感恩。

高山仰止，景行行止。我要感谢我的导师——王幼民教授，唐铃凤教授。感谢王老师和唐老师每次在组会上对我的指导，培养起我对科研的兴趣，提升我的科研能力，在我每次感到迷茫，犹豫不决的时候，是你们帮我分析其中的道理，让我有了最终的抉择。王老师和唐老师每周一次的组会，到最后为了我的毕业论文，甚至起早带晚一周两次组会帮助我修改论文，感谢您一直不厌其烦的修正我的毕业设计，两位老师老师的严谨和认真使我终身受益。

时光清浅，幸之相遇。感谢我的师兄杨克帆、吴虎等等，我的同门方旭、杨凯、张丽丽、王鲁、卢娜、柯启迪，我的师弟师妹们以及我的同班同学们，感谢能够在硕士三年与你们相遇，在我困难无助的时候，在我焦头烂额的时候是你们伸出援助之手，帮助我解决困难。同时感谢中鼎恒盛气体股份有限公司技术部所有员工，谢谢你们在我实习的时候给予我莫大的关怀，为我提供技术指导。感谢我所有的授课老师，在你们的悉心教导下，我才有厚实的专业基础完成毕业设计。

舐犊情深，伯俞泣杖。感谢我的父母将我养育成人，感谢父母在我成长过程中对我的无私关爱，我的父母尽最大的努力帮助我扫清障碍，无论多么困难，父母都会永远陪在身边帮助我健康成长，在我欢天喜地的时候，父母为我祝贺陪伴着我一起开心。感恩父母一直在为我默默地做奉献，为我提供一个非常舒适的学习环境，让我在人生的道路上走的更远。

始于外表，终于内在。感谢我的女朋友王静，多年的陪伴，温暖一生，所爱隔山海，山海皆可平，谢谢你的所有陪伴，才能让我安心学习，得到充实的知识，谢谢你在我考博的时光里不离不弃，一直包容我，让我成功上岸，愿我们能够相伴一生。

送君千里，终有一别。感谢所有的相遇，山高路远，我们日后再见。

尚德敏学 唯实惟新

