

薄板冲压成型的回弹预测研究

作者：许京荆
专业：机械设计和理论
导师：张直明
吴益敏



上海大学出版社

· 上海 ·

N533
Y302
2002

2002

薄板冲压成型的回弹预测研究

江苏工业学院图书馆
藏书章

作者：荆
专业：机械设计和理论
导师：张直明
吴益敏

上海大学出版社

· 上海 ·

533

1307

2002

Shanghai University Doctoral Dissertation(2002)

Springback Prediction in Sheet Metal Forming

Candidate: Xu Jingjing

Major: Mechanical Design and Theory

Supervisors: Prof. Zhang Zhiming

Prof. Wu Yimin

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查确认,符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任: 王成焘	教授, 上海交通大学	200030
委员: 冯 伟	教授, 上海大学力学所	200072
钱 江	教授, 同济大学	200080
金庆铭	教授, 上海理工大学	200093
沈仁康	教授, 同济大学	200080
导师: 张直明	教授, 上海大学	200072
吴益敏	教授, 上海大学	200072

评阅人名单:

王成泰	教授, 上海交通大学	200030
陈念贻	研究员, 上海交通大学	200030
潘立宙	教授, 上海大学力学所	200072

评议人名单:

冯 伟	教授, 上海大学力学所	200072
洪钟瑜	教授, 上海理工大学	200093
沈培德	教授, 上海同济大学	200080
张国贤	教授, 上海大学	200072

答辩委员会对论文的评语

薄板冲压成型过程是一个包含多种复杂物理现象的工艺过程。回弹的难以控制导致了模具的设计困难。如何找到一种可靠的方法预测回弹,提高冲压件成型精度,是薄板冲压成型中的难题。许京荆同学结合“福特中国研究与发展基金项目”,开展了“薄板冲压成型的回弹预测研究”工作,具有很强的实用价值和较高的学术意义。论文工作取得了如下具有创新性的研究成果:

1. 创造性地提出了将 Data Mining 技术与有限元法结合,预测 U 型与 V 型件冲压成型的回弹。

2. 找出模拟规律,进而得到可靠的回弹模拟的预测结果,误差控制在 10%以内。与国际上同行所作的数据相比,预测误差大大减小。

3. 采用遗传算法有效地辨识材料参数。将辨识参数输入有限元模型,提高了有限元回弹数值模拟的精度。

4. 影响回弹的因素很多。论文考察了多个因素的组合对回弹的影响。同时采用均匀设计法安排回弹数值模拟方案,提高了计算效率。

5. 将最佳投影法与人工神经网络结合,对实验结果和数值模拟结果采用多种数据处理技术进行分析,建立了回弹预测的数学模型。

6. 论文给出了一些很有价值的结论,如: V 型件冲压成型中,虚拟速度相对次要,过渡圆弧与板料网格之比较为重要等

等。以上研究成果对于提高回弹预测精度，缩短模具设计周期等具有较强的指导意义。

论文语言通顺，层次清晰，图表规范，数据可靠。答辩过程中叙述清楚，回答问题正确。

综上所述，说明许京荆同学在有限元分析和数据处理方面具有宽广深厚的理论基础和系统深入的专业知识，具有独立从事科研工作的能力。

答辩委员会表决结果

答辩委员会采用无记名投票方式，以全票通过许京荆同学博士学位论文答辩，并建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席：**王成泰**

2002年4月5日

摘 要

薄板冲压成型的回弹是指薄板冲压加工后出现弹复现象使得薄板的最终成型和模具形状不一致. 薄板冲压成型过程由薄板冲压成形和回弹两部分组成, 是一个包含接触碰撞、摩擦磨损、大位移、大转动和大变形、弹塑性变形等多种复杂物理现象的工艺过程, 回弹的难以控制导致了模具的设计困难. 而近年来, 高强度薄钢板与铝合金薄板在汽车车身制造中得到大量应用, 使回弹问题更加突出. 因此, 如何找到一种可靠的方法预测回弹, 提高冲压件成型精度, 是薄板冲压成型中的难题.

影响回弹的因素非常复杂, 以目前的研究水平要给出其精确的理论表达形式是不可能的, 因此国际上广泛采用有限元方法 FEM 进行薄板冲压加工的数值模拟. 但是研究结果表明薄板冲压成型的回弹预测是不准确的(对标准考题的回弹预测平均误差为 62%). 所以如何提高数值模拟精度成为薄板冲压成型的回弹研究的热点和难点.

本文完成了薄板冲压成型的回弹预测研究. 以 V 形冲压件成型为研究对象, 将 FEM 和 Data Mining 技术相结合预测薄板冲压成型中的回弹, 最终建立回弹预测的数学模型, 可以将回弹预测误差控制在一定的范围内(本文设定为 10%) 具体描述如下:

通过有限元方法对薄板冲压成型进行数值模拟, 对薄板冲压成形的过程采用动态显式算法, 采用静态隐式算法完成冲压件成形后的回弹模拟. 数值模拟的有效性由 NUMISHEET'93 的

U 形件深拉回弹标准考题加以验证.

以 V 型薄板冲压件成型作为研究对象, 对宝钢提供的镀锡薄钢板进行拉伸试验, 得到有关材料参数. 接着对 V 型冲压件进行模具设计及加工, 并在 Zwick 压力机上进行了 V 型薄板冲压件成型试验, 现场测试得到回弹角度.

根据拉伸试验获得的材料应力、应变、应变率的关系, 对传统方法不能胜任的材料模型参数识别问题采用遗传算法, 用 VC++6.0 进行编程, 辨识弹塑性模型中材料参数.

考虑到利用 Data Ming 技术对回弹模拟结果进行预测, 需要有足够信息量的回弹数据, 但是工作量也不能太大. 因此本文引入均匀设计方法, 考察网格剖分密度、摩擦系数、罚因子、虚拟速度等多个可变因素对回弹模拟结果的影响, 设计了进行 V 型薄板冲压件成型的数值模拟方案.

根据设计方案, 使用 ANSYS/LS-DYNA5.71 有限元分析软件, 编写有限元 APDL 程序, 完成 V 型薄板冲压件成型的数值模拟. 利用 Data Ming 技术对回弹数据进行分析, 这里可分为定性和定量两种回弹研究及数学模型的建立如下:

本文通过模式识别方法建立定性的回弹预测数学模型, 以回弹数值模拟的结果和试验测量结果之间的误差得到的数据作为源数据, 采用逐级最佳投影法对源数据加以分析, 得到的超多面体模型用来描述回弹模拟计算偏差的可控边界, 从而建立回弹预测的数学模型, 并通过增补数据对建立的回弹预测模型加以验证. 这样通过调整可变因素的不同组合使回弹数值模拟误差根据需要控制在一定范围内(本文将误差控制在 10%之内).

本文也通过统计回归等数学方法建立定量的回弹研究的数学模型. 根据 V 型薄板冲压件成型的试验结果, 采用多元线性

回归方法建立了表征试验回弹角与变量参数关系的数学模型。而对 FEM 计算结果和试验测量结果得到的回弹误差数据,采用 bp 人工神经网络算法和逐级最佳投影法方法建立回弹预测数学模型,用留一法验证该模型用于回弹预测的可靠性是令人满意的。

除此之外,采用 FEM 和 Data Mining 技术,还对其他的薄板成型中的弹塑性材料模型加以分析,建立相应的回弹预测数学模型,并对不同的弹塑性材料模型对回弹数值模拟的影响加以比较分析得到有用的结果。

关键词 薄板冲压成型,回弹预测,有限元方法 FEM,数据挖掘 Data Mining,数值模拟,拉伸试验,冲压试验,遗传算法,均匀设计方法,模式识别,逐级最佳投影法,统计回归,逐步回归法,BP 人工神经网络,材料模型

Abstract

The springback in sheet metal stamping can be described as the change of sheet metal shape compared with the shape of the tools after forming process. There are many nonlinear factors, which include contact and impact, friction, large deformation, large displacement, large rotation, elastic and plastic material characters, will influence the forming process and result in the product disfigurement such as wrinkle, break and springback. Springback leads to the difficulty in die design. Currently, sheet metal materials with high strength-to-modulus ratio such as high strength steels and aluminum alloys are widely applied to the construction of car body, and these materials are particularly prone to springback. Therefore, how to find an effective and reliable method for springback prediction is very important.

Due to complicated factors, no precise theory can express the springback. The finite element method (FEM) is popularly used to simulate the springback in sheet metal stamping, but the springback average error of the benchmark is over 62%, the results of springback prediction are not satisfying, and the springback prediction cannot directly apply to die design.

In this paper the springback prediction of the V-shape part is completed combined the FEM with data mining technique. Finally the mathematics model of the springback prediction is built as follows.

The springback simulation is finished by FEM in sheet metal stamping. Here, the dynamic explicit method is adopted to calculate the forming and the static implicit method is used for calculating the springback after forming process. The reliability of the numerical simulation is verified by the benchmark of U-shape deep draw springback in numisheet'93.

The springback of V-shape part in sheet metal stamping is used as the study object. The tensile tests of the sheet metal materials are achieved and the relative parameters such as stress, strain and strain ratio are gotten. The die design of V-shape tools is finished. The springback experiments in sheet metal stamping are carried out on Zwick tension machine, and the springback angles are measured.

According to the material tensile test, the elastic and plastic material model coefficients are identified by genetic algorithm, and the genetic algorithm code is compiled with VC++6.0.

Using the data mining technique to predict the springback needs enough information, the even design idea is introduced to arrange the simulation scheme. There are five important factors, which include the virtual stamping speed v , the penalty factor fc , the ratio of die mesh density to blank mesh density ed , the ratio of die fillet radius to blank mesh density eb and friction coefficient f , are considered.

Based on the simulation scheme, the springback simulations are completed by using ANSYS/LS-DYNA5.71 FEM software and my compiling the APDL code. Comparing the calculations and experiments, the difference between the two results are taken as

source data, and then the data mining methods are used to analyze the springback error data. Lastly the mathematics models are established and the springback error can be controlled less than 10%. The mathematics models can be divided qualitative analysis results and quantitative analysis results as follows.

The qualitative analysis results are realized by pattern recognition. The hierarchical optimal map recognition (HOMR) method is adopted to build the hyper-polyhedron model and get the boundary equations which control the springback error is less than 10%. The appending random data have verified the correction of mathematics model.

The quantitative analysis results are achieved by statistics methods. The BP neural network algorithm and HOMR method are adopted to establish the mathematics model and the leaving one method verifies the good springback prediction results.

Combining FEM with data mining technique, the others examples that include using different material model and using different blank are analyzed and verified. At the same time, some useful conclusions are gotten.

Key words sheet metal stamping, springback prediction, finite element method, data mining, numerical simulation, tensile test, stamping experiment, genetic algorithm, even design idea, pattern recognition, hierarchical optimal map recognition, statistic regression, step regression method, BP artificial neural network, material model

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 薄板冲压成型回弹预测的研究背景	1
1.2 薄板冲压成型回弹研究概况	5
1.3 薄板冲压成型回弹预测的研究方法	18
1.4 小 结	19
第二章 薄板冲压成型回弹的有限元数值模拟技术	21
2.1 薄板冲压成型回弹过程采用有限元进行数值 模拟的方法及步骤	21
2.2 薄板冲压成型回弹数值模拟的相关理论	25
2.3 薄板冲压成型过程的有限元数值模拟过程	44
2.4 小 结	47
第三章 薄板冲压成型回弹的试验技术	48
3.1 薄板冲压成型回弹试验	48
3.2 测量材料参数试验	55
第四章 遗传算法辨识薄板冲压成型回弹模拟的材料参数 ..	61
4.1 引 言	61
4.2 材料模型参数辨识问题描述	62
4.3 遗传算法辨识材料参数的实现	64
4.4 小 结	69

第五章 均匀设计方法安排回弹数值模拟方案	71
5.1 均匀设计方法概述	71
5.2 均匀设计方法在回弹数值模拟中的应用	74
第六章 Data Mining 数据处理	82
6.1 概 述	82
6.2 模式识别算法	83
6.3 对冲压成型回弹试验结果数据的分析	93
6.4 建立冲压成型回弹预测的数学模型	102
6.5 小 结	113
第七章 冲压成型回弹预测的其他算例	115
7.1 算例 1: 建立不同材料模型的 V 型零件冲压 成型回弹预测模型	115
7.2 算例 2: 0.28mm 薄板 V 型零件冲压 成型回弹预测	125
7.3 结 论	135
第八章 总 结	137
8.1 全文总结	137
8.2 本文创新之处	145
8.3 未来工作	145
参考文献	146
致 谢	155

第一章 绪 论

1.1 薄板冲压成型回弹预测的研究背景

薄板冲压成型是利用金属塑性变形的特点,通过一定的工艺方法对金属薄板施加压力,使其产生永久的塑性变形,获得所需要的各种形状的零件.薄板冲压成型过程由薄板冲压的成形过程和板料成形后的回弹组成.薄板冲压成型作为一种塑性成形方法,广泛应用于汽车、航空航天、电器、造船、仪表等工业领域.随着汽车技术的出现和不断成熟,薄板冲压成型技术在汽车制造中显得尤为重要,因为汽车覆盖件大都由薄板冲压而成.汽车覆盖件冲压成型质量的好坏不仅影响到整车装配和汽车外观,更影响到汽车的制造成本以及新车型开发的周期.因此,人们不断改进冲压成型设备,研究材料成型性能,在科学实验的基础上,提出了一系列薄板冲压成型计算理论、经验公式和工艺准则等^[55].

20 世纪 70 年代以来,随着计算机技术的广泛使用,使得利用有限元方法对薄板冲压成型过程进行数值模拟成为可能.目前,冲压过程的计算机模拟和分析技术 CAE 已经在实际生产中得到应用,帮助解决模具和工艺设计难题,同时由于模具 CAD 和 CAM 的技术不断成熟,使得 CAD/CAE/CAM 一体化过程成

为一项工业高新技术. 通过该技术可以大大缩短新产品模具和工艺的设计和制造周期, 降低成本, 提高产品质量. 然而由于薄板冲压成型过程包含接触碰撞、摩擦磨损、大位移、大转动和大变形、弹塑性变形十分复杂的物理现象. 这种复杂性使得对它的设计和控制非常困难, 从而造成成型过程中产生许多缺陷. 起皱、破裂和回弹是薄板成型中的三种主要缺陷, 其中回弹是最难控制的^[1].

回弹(springback)是指板材冲压成型时, 板材变形贮存的弹性能在模具卸除之后, 由于弹性能的释放而使板材产生弹复现象, 从而造成成型后的形状与模具形状的不一致. 这一现象在强度-弹性模量比高的材料如高强度钢或高强度铝合金板材成型时尤为显著. 而近年来, 出于安全性和经济性考虑, 高强度薄钢板与铝合金板在汽车车身制造中得到大量应用. 美国和日本从八十年代初开始广泛使用低合金高强度钢板, 使汽车车身零件板厚由原来的 1.0~1.2 mm 减薄到 0.7~0.8 mm. 到 1992 年, 日本各汽车厂汽车车身采用高强度钢板的平均比例占到 23.3%. 99 法兰克福车展上, 奥迪公司展示了一辆全铝制空间框架的轿车——奥迪 A2, 这是世界上第一款批量生产的全铝制车身轿车. 然而, 高强度钢与铝合金的机械性能和普通低碳钢有很大差异, 导致由这两类材料冲压成的车身覆盖件的回弹量远大于普通低碳钢板, 使回弹问题更加突出. 回弹问题的存在会影响零件的形状尺寸精度和表面质量. 冲压件的最终形状取决于成型后的回弹量, 当回弹量超过允许容差后, 就成为成型缺陷, 进而影响整体装配. 由于目前对汽车装配质量的要求日益提高, 综合装配误差严格控制在较小的数值范围内, 国内上海大众汽车有限公司也正在开展 “2 mm” 工程(综合装配误差控制在 2 mm 以