

# 基于 GA-BP 神经网络的钣金折弯过程随动预测模型

张香港,游有鹏,王国富

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**提出一种利用 GA-BP 神经网络预测钣金折弯过程中折弯机器人机械臂末端夹持点轨迹模型的方法。通过钣金折弯实验与 ANSYS 仿真对比,得到最佳的仿真条件;使用参数化建模,针对不同的影响因子如钣金材料的弹性模量、屈服强度、强化系数和钣金件及上下模几何形状等,进行批量化仿真获得模型训练数据;通过对 BP 神经网络训练建立折弯随动模型,并引入遗传算法对 BP 神经网络的初始权重和阈值进行优化,解决 BP 神经网络存在的过拟合和局部最优问题;通过测试集进行验证评估,结果表明该折弯随动模型相对误差在 0.4% 以内,可满足常规折弯工艺的应用需求。

**关键词:**钣金;折弯随动;遗传算法;GA-BP 神经网络;ANSYS 仿真

**中图分类号:**TP24 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0081-04

## Prediction Model of Bending Follow-up Based on GA-BP Neural Network

ZHANG Xianggang, YOU Youpeng, WANG Guofu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A method for predicting the trajectory model of the end clamping point of bending robot manipulator in the process of sheet metal bending by using GA-BP neural network is proposed. Through the comparison between sheet metal bending experiment and ANSYS simulation, the best simulation conditions are obtained. For different influence factors such as elastic modulus, yield strength, strengthening coefficient of sheet metal materials, geometry of sheet metal parts and upper and lower dies, parametric modeling is applied to conduct batch simulation so as to gain the model training data. The bending follow-up model is established by training BP neural network, and the genetic algorithm is introduced to optimize the initial weight and threshold of BP neural network to solve the over fitting and local optimization of BP neural network. By test set, verification evaluation is carried out, whose result shows that the relative error of the bending follow-up model is less than 0.4%, which meets the application requirements of conventional bending process.

**Keywords:** sheet metal; bending follow-up; genetic algorithm; GA-BP neural network; ANSYS simulation

## 0 引言

钣金折弯加工是一种典型的钣金成型加工工艺,广泛应用于汽车工业、造船、航空等领域<sup>[1]</sup>。传统的钣金折弯以人工辅助为主,劳动强度大,还存在一定的安全隐患,这促进了机器人辅助钣金折弯的自动化折弯加工的快速发展。在机器人自动化折弯过程中,机器人的折弯跟随控制,即机器人携带板材随折弯机上模的下压、板材的折弯成形做折弯随动,其末端位姿轨迹比较复杂,与上模运动的同步要求较高,如果存在较大的随动轨迹误差,可能导致加工板材产生附加变形<sup>[2]</sup>。可见,建立准确的折弯机上模运动与折弯机器人末端位姿之间折弯随动模型至关重要,它是实现机器人高精度折弯跟随控制的前提<sup>[3]</sup>。

目前,已有一些文献开展了折弯机器人在折弯随动过程中的理论位姿模型研究。刘荣、谢敏等<sup>[4-5]</sup>采用几何法建立了钣金夹持点的机器人位姿模型,但未考虑折弯机上

模下模的圆角半径的影响,精度不够高。张涛<sup>[6]</sup>通过考虑折弯机上/下模圆角半径的几何模型,得到了夹持点轨迹与上模同步运动的距离关系,但未考虑折弯过程中变形区钣金厚度方向的变化,在厚钣金件的折弯中仍会出现较大误差。许路佳等<sup>[7]</sup>提出中性层位移系数概念,利用钣金折弯过程中中性层长度不变特性,计算得到夹持点空间位置坐标与钣金折弯参数之间的数学关系,但中性层偏移无法准确测量,影响了模型精度。

为了避免几何法的简化误差,同时考虑到材料折弯成形区的变形关系复杂,难以准确描述。本文通过建立钣金折弯成形工艺系统的有限元仿真模型,模拟钣金折弯的变形过程,获得钣金夹持点位姿随上模下压更准确的同步运动轨迹。

仿真法可以消除几何模型的模型误差,但是耗时长、适用性差,无法运用在实际工业生产中。需要一种泛化的数学模型,能够适用不同的钣金件、不同的折弯工况。因此本文采用 GA-BP 神经网络模型,对折弯过程中折弯机

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2018YFB1309203)

**第一作者简介:**张香港(1997—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为机器人折弯控制系统。

器人机械臂末端轨迹进行预测,并通过验证集验证模型的精度与可靠性。

### 1 折弯工艺有限元仿真

钣金折弯有限元建模重点考虑材料模型、接触方式、网格单元类型以及网格划分等。为保证仿真的准确性,需要合理地优化模型参数,并最终通过工艺试验进行验证。

通过 ANSYS Workbench 显示动力学的方法实现钣金折弯过程的有限元仿真,具体求解流程如图 1 所示。

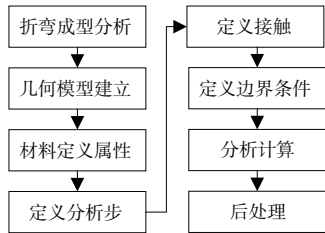


图 1 钣金件折弯有限元仿真流程图

#### 1.1 三维建模

钣金折弯有限元仿真采用 ANSYS Workbench 参数化建模,以保证折弯模型的通用性,并提高建模工作的效率。三维模型参考钣金折弯的几何模型进行设计,如图 2 所示。其中, $R_u$ 表示上模圆角半径; $R_d$ 表示下模圆角半径; $W$ 表示下模开口槽宽; $l$ 表示钣金件长度; $t$ 表示钣金件厚度; $L$ 表示夹持点与参考原点距离; $\theta$ 为折弯角,表示夹持点和  $x$  轴夹角大小。

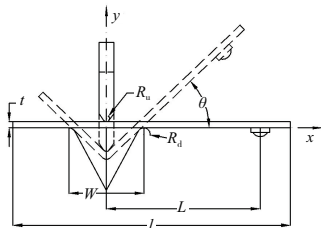


图 2 钣金折弯几何模型

在三维建模过程中,对钣金件进行分割处理,使得钣金件与上下模接触区域(左侧)和钣金件远离上下模区域(右侧)可以实现不同网格精度的划分,从而在保证仿真精度的时候,提高仿真效率。简化后的折弯模型如图 3 所示。

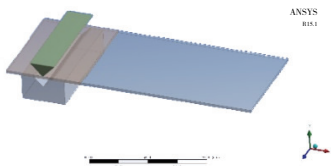


图 3 钣金折弯的三维模型

#### 1.2 有限元仿真

有限元分析模型按照如下条件建立:折弯机上下模设

置为刚体,故不考虑材料属性;钣金件材料选用 304 不锈钢板,其材料密度为  $7\ 930\text{ kg/m}^3$ ,泊松比  $\mu=0.25$ ,弹性模量  $E=193\text{ GPa}$ ,材料屈服强度  $\sigma_s=273\text{ MPa}$ ;钣金件与上下模均采用摩擦接触,设置摩擦系数为 0.2;下模设置为固定,上模垂直向下运动,运动速度的数据源自折弯机实际的速度-时间曲线。

有限元模型网格的处理需要兼顾模型准确性和仿真计算效率。网格划分采用软件自主划分方法,设置钣金件与上下模非接触区域网格尺寸为 10 mm,钣金件与上下模接触区域网格尺寸分别设置为 2 mm、3 mm、5 mm、7 mm 和 10 mm 等 5 种网格。

分别对 5 种不同网格的有限元模型进行仿真,其中 10 mm 网格仿真结果如图 4 所示。

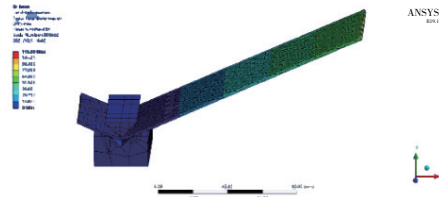


图 4 10 mm 网格钣金折弯有限元仿真结果

### 2 钣金折弯实验

为验证仿真的准确性,需要对仿真数据进行验证。验证的对比数据来自于钣金折弯实验。

#### 2.1 钣金折弯实验

钣金折弯实验使用 MB8-100X4200 型数控折弯机,如图 5 所示,模具参数分别为:上模圆角半径  $R_u=1\text{ mm}$ ,下模圆角半径  $R_d=2\text{ mm}$ ,下模开口槽宽  $W=16\text{ mm}$ 。实验选用的钣金件材料与仿真一致,均为 304 不锈钢;折弯试件规格为 500 mm(长)×250 mm(宽)×2 mm(厚)。分别对 3 张试验板材进行 2 次折弯,共进行 6 次折弯实验,相应的折弯试样如图 6 所示。



图 5 MB8-100X4200 型数控电液折弯机

实验中,折弯机上模的实时位置通过读取 Heidenhain LS629 增量式光栅尺获取,其分辨率 0.001 mm,测量精度不高于  $\pm 2\ \mu\text{m/m}$ 。

为获得钣金折弯时机器人夹持点的空间位置变化规律,采用图 7 所示的 Vantage S 型激光跟踪仪实时跟踪靶球坐标位置,并参照钣金仿真设置,将靶球放置在夹持点位置。当折弯机上模到达夹紧点,即上模刚接触钣金件的位置,折弯机控制系统发出信号,使激光跟踪仪开始跟踪靶球,并以 512 个测量点/s 的采样速率记录靶球实时位

置,其位置跟踪测量精度为  $16\ \mu\text{m}+8\ \mu\text{m}/\text{m}$ 。

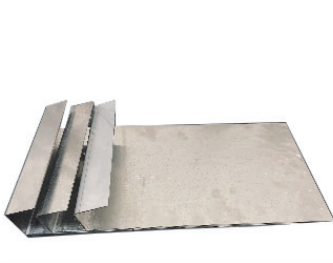


图6 折弯实验试样



图7 激光跟踪仪

实验中,折弯机工进行程  $5\ \text{mm}$ 、工进时间  $2.15\ \text{s}$ ,激光跟踪仪可采集  $1\ 100$  个位置点。

由于折弯机上模行程数据由折弯机控制系统记录,激光跟踪仪数据由 PC 端记录,因此需要将折弯机上模行程数据和靶球位置数据关联。关联依据为:激光跟踪仪测量靶球的起始位置数据与折弯机上模行程的夹紧点位置数据相对应。

## 2.2 有限元仿真数据与实验数据对比

为便于将实验与仿真数据对比,按照上模行程每  $0.25\ \text{mm}$  进行取样,从靶球的采样点中共取样  $21$  个特征点作为仿真验证数据。其中某次实验的数据如图 8 所示。

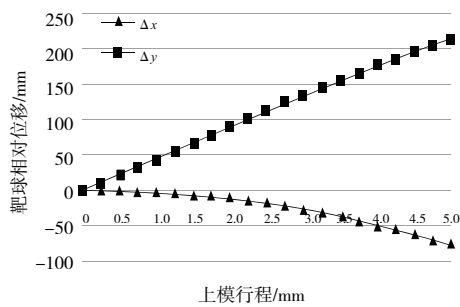


图8 靶球随上模运动的位移

将有限元仿真所得数据,按照钣金件与上下模接触区域网格参考尺寸的大小,从小到大依次记为仿真一、仿真二、仿真三、仿真四和仿真五。以  $y$  轴方向为例,按上模行程每  $0.5\ \text{mm}$  进行取样,将激光跟踪仪所得实验数据与有限元仿真所得数据进行对比,结果如表 1 所示,并使用拟合优度指标  $R_{\text{NL}}$  作为评价标准。

$$R_{\text{NL}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum \hat{y}_i^2}} \quad (1)$$

式中: $\hat{y}_i$  为仿真数据; $y_i$  为折弯实验数据。拟合优度指标  $R_{\text{NL}}$  愈接近 1,则表明仿真数据愈接近实验数据。

仿真一、仿真二、仿真三、仿真四和仿真五的拟合优度  $R_{\text{NL}}$  分别为  $0.978\ 8\ \text{mm}$ 、 $0.973\ 4\ \text{mm}$ 、 $0.928\ 5\ \text{mm}$ 、 $0.892\ 4\ \text{mm}$  和  $0.765\ 4\ \text{mm}$ 。

随着网格的细化,拟合优度逐渐增加,仿真与实验误差逐步减小,在仿真二的条件下,仿真和实验所得数据已足够接近,表明在此仿真条件下的仿真足以准确模拟钣金折弯实验;如继续细化网格,仿真精度提升不大,但仿真时间会成倍增加。因此,本文选用仿真二作为最优仿真条件。

表1 钣金件  $y$  轴位置变化的仿真与实验对比

		单位: mm					
序号	上模行程	实验	仿真一	仿真二	仿真三	仿真四	仿真五
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.5	22.21	22.57	22.38	23.20	24.79	28.00
2	1.0	47.18	47.79	49.00	48.83	53.33	58.95
3	1.5	66.73	69.00	67.12	74.74	73.16	83.47
4	2.0	87.01	87.65	89.15	91.81	98.51	112.01
5	2.5	107.42	111.35	108.92	117.25	120.10	132.17
6	3.0	129.08	128.75	133.25	144.54	144.08	165.86
7	3.5	149.00	147.74	155.02	159.73	168.22	185.09
8	4.0	170.58	177.08	176.62	179.81	186.62	208.80
9	4.5	195.32	193.84	196.95	208.99	213.79	238.41
10	5.0	217.06	220.64	221.87	227.14	239.49	264.13

## 3 折弯随动模型的构建

根据折弯工艺,钣金件折弯时的变形规律和上下模形状、钣金强度、弹性模量、钣金件尺寸有关,钣金的折弯变形、夹持点的位移及角度变化随上模运动呈非线性演化。为此,引入有优越的非线性动态处理能力的 BP 神经网络,用于折弯随动的建模与实时计算;并引入遗传算法对 BP 神经网络的初始权重和阈值进行优化,以大幅提高 BP 神经网络的预测速度,解决 BP 神经网络存在的过拟合和局部最优,从而提高预测精度,改进模型的收敛速度和泛化能力。

### 3.1 神经网络的数据集

为使建立的折弯随动模型能够适用不同的钣金件与折弯工况的实际生产,需要一定量的实验数据训练神经网络,提高其泛化能力,并通过仿真实验获得训练数据。

仿真实验的工艺条件与参数范围,主要结合生产实际和参考工艺手册进行选择,主要参数包括上模圆角半径  $R_u$ 、下模圆角半径  $R_d$ 、下模槽宽  $W$ 、钣金件弹性模量  $E$ 、屈服强度  $\sigma_s$ 、强化系数  $K$ 、硬化系数  $n$ 、板厚  $t$ 、板长  $l$ 、上模行程  $D$ 、夹持点距折弯线的距离  $L$  等。仿真实验产生的结果参数为夹持点的位置与角度。

仿真方案有多种,此处以每种不同的下模槽宽分类,通过有限元仿真获得  $150$  组数据,5 种宽度共计获得  $750$  组训练数据。从中随机抽取  $20$  组作为测试样本,其余样本拆分为  $80\%$  与  $20\%$  作为训练集和验证集。

### 3.2 基于 GA 的 BP 网络初值优化

折弯随动 BP 网络模型的输入层为上述  $11$  个工艺条件参数,输出层为所求  $3$  个位姿参数,并设置隐含层神经元节点为  $15$ 。

利用遗传算法优化 BP 神经网络的初始权值和阈值,具体方法如下。



## 1) 编码与解码

编码:采用实数编码,以保证网络权值和阈值的精度。

解码:经过遗传算法的迭代,会得一个最优的串结构数据,串结构上的每一个数据代表着BP神经网络的一个权值或阈值,根据实际的BP神经网络权值和阈值的结构进行分配。

## 2) 适应度函数

根据个体得到BP神经网络的初始权值和阈值,用训练数据训练BP神经网络后预测系统输出,把预测输出和期望输出之间的均方误差 $M_{SE}$ 作为个体适应度值。计算公式为

$$M_{SE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

式中: $n$ 为网络输出节点数, $y_i$ 为BP神经网络第 $i$ 个节点的期望输出, $\hat{y}_i$ 为第 $i$ 个节点的预测输出。均方误差 $M_{SE}$ 愈小,表明个体适应度愈好。

## 3) 选择、交叉与变异

选择:采用轮盘赌选择法,即适应度越大的染色体被选择的概率就越大。

交叉:交叉操作是产生新个体的主要方法。本文采用实数交叉法,即第 $k$ 个染色体 $a_k$ 和第 $l$ 个染色体 $a_l$ 在 $j$ 位的交叉计算方法如下:

$$\begin{cases} a_{kj} = a_{kj}(1-b) + a_{lj}b \\ a_{lj} = a_{lj}(1-b) + a_{kj}b \end{cases} \quad (3)$$

式中 $b$ 是 $[0,1]$ 的随机数。

变异:选用均匀变异算法。均匀变异算法可以提高遗传算法的局部搜索能力,还可以防止过早收敛的现象。

## 3.3 模型分析

基于以上模型构建,使用训练集的584组样本分别对BP神经网络和GA-BP神经网络进行训练,以此验证模型有效性并对比两种网络的综合性能。

训练后,使用随机选定的20组测试样本对网络进行测试,并将BP预测结果、GA-BP预测结果分别与有限元仿真结果进行比较。钣金折弯过程中夹持点 $y$ 轴方向位移如图9所示;测试样本与网络预测值相对误差如图10所示。

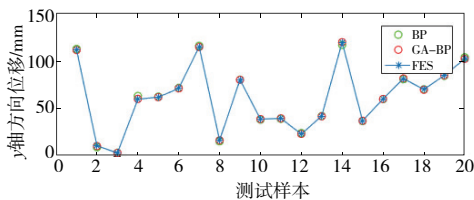


图9 夹持点 $y$ 轴位移预测值与仿真值对比

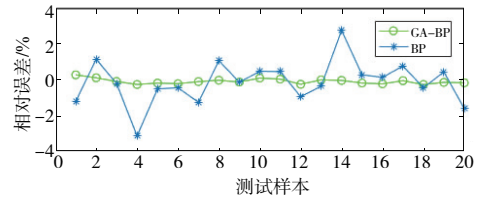


图10 测试样本与网络预测值相对误差

由图9可以看出两种网络均能准确预测出钣金折弯过程中夹持点 $y$ 轴方向位移;但GA-BP神经网络预测准确度明显高于BP神经网络。

由图10分析可得:BP神经网络预测结果与有限元仿真结果的最大误差为3.6%,而GA-BP神经网络预测结果与有限元仿真结果的最大误差只有0.4%,其误差远小于BP神经网络的预测误差。

由此可见,GA-BP神经网络模型是更好的折弯随动模型,位置的相对误差在0.4%以内,具有较好的工程应用前景。

## 4 结语

本文基于ANSYS Workbench有限元仿真平台,建立了钣金折弯成形工艺系统的有限元仿真模型,模拟钣金折弯的变形过程,并与钣金折弯实验对比,选取最优有限元仿真条件。利用GA-BP神经网络算法,基于仿真折弯仿真数据,建立折弯随动模型,可依据钣金件几何与材料参数及上下模关键几何尺寸作为模型的输入,获得夹持点的位姿。基于GA-BP神经网络模型训练精度较高,误差远小于BP神经网络的预测误差,可满足常规折弯工艺需求,具有较好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 沈明. 钣金工艺及模拟仿真分析[D]. 苏州:苏州大学,2011.
- [2] TRZEPICINSKI T, LEMU H G. Prediction of springback in the air V-bending of metallic sheets[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019,645(1):012011.
- [3] 杨中. 面向折弯作业的五自由度机械臂设计及运动控制研究[D]. 南京:南京邮电大学,2018.
- [4] 刘荣,楼佩煌,武星,等. 折弯机器人折弯随动路径规划与运动控制[J]. 机械科学与技术,2015,34(9):1333-1339.
- [5] 谢敏,刘荣,金钰飞,等. 折弯单元折弯机器人跟随折弯运动模型研究[J]. 机械制造与自动化,2013,42(5):148-149,211.
- [6] 张涛. 基于机器人折弯应用的运动规划[J]. 金属加工(热加工),2018(8):63-66.
- [7] 许路佳,范立成,张凤明. 一种钣金折弯过程抓取点轨迹计算方法的研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(3):99-100,117.

收稿日期:2021-11-15