

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.03.006

# 基于人工智能的机器人折弯机滑块行程研究

翁伟

(福建信息职业技术学院 机电工程系, 福建 福州 350003)

**摘要:** 针对金属板料折弯工艺和更高精度的要求,提出基于人工智能神经网络的机器人折弯新技术。对机器人弯折工艺进行特征参数分析及提取,并建立改进算法的 BP 神经网络模型;比较了不同机器人折弯训练函数下的性能,建立更加有效的神经网络训练函数。通过经验实测值与改进算法的 BP 神经网络预测值对比,验证了所确定的机器人折弯的改进 BP 神经网络能够更加精准确定折弯工艺过程中所需的滑块行程,提高了折弯工艺精度。

**关键词:** 机器人; 弯折; 人工智能; BP 神经网络; 滑块行程

**中图分类号:** TP271

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2016)03-0232-05

## Research on the slider stroke of robot bending machine based on artificial intelligence

Weng Wei

(Mechanical and Electrical Engineering Department, Fujian Polytechnic of Information Technology, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** To improve the bending process of metal plate and to meet the requirement of higher precision, a new technology of robot bending based on artificial intelligence neural network was proposed. The parameters of robot bending plate process were analysed and extracted, and a back propagation (BP) neural network model via improved algorithm was established. The performances under different robot bending training functions were compared and a more effective neural network training function was formulated. Comparison was made between the measured result and BP neural network preditting (forecasting) result. The results indicate that the BP neural network for robot bending can determine the slide stroke required by the bending process more accurately, and can improve the precision of the bending process.

**Keywords:** robot; bending; artificial intelligence; back propagation (BP) neural network; slider stroke

机器人折弯机的折弯过程是金属板料冷加工中较为复杂的过程,除了机器人本身的运动控制外,V形板料折弯滑块下压行程的控制一直是业内技术上的难点。对于滑块下压行程,现阶段只有常用的3种钣金材料(钢板、铝板、不锈钢板)的部分特殊角度的折弯系数表,尚无能够计算折弯系数的明确公式<sup>[1-3]</sup>。为了获得较高的弯折精度,国外一些优秀企业采用先进的液压系统和自动补偿数控的折弯机能够自校正折弯系数,但技术复杂,成本较高。由于金属板料折弯工艺和更高精度的要求,有必要采用人工智能神经网络对机器人折弯机中滑块的下压行程进行有效预测,以较低的成本获得较高的加工精度。

## 1 机器人折弯特征参数分析

### 1.1 机器人折弯基本工作原理

工业机器人折弯的运动轴一般包括3个臂轴(S、L和E轴)和3个腕轴(R、B和T轴),并且在

收稿日期: 2016-05-24

基金项目: 福建省教育厅项目(JA15684)

作者简介: 翁伟(1976-),男,福建莆田人,讲师,硕士,主要研究方向:自动化技术与应用研究。

其工作区( $T$ 轴法兰盘)末端安装吸附式工装,其工作过程主要包括取料、折弯和码垛<sup>[4]</sup>。在机器人折弯金属板料过程中,主要包括校正折弯、三点折弯和自由折弯等。其中自由折弯在机器人金属板料折弯中应用最为广泛。机器人折弯机基本工作原理如图 1,利用凹模开口处的两棱边和滑块顶端的棱边相对运动对材料进行折弯,该模式下无需滑块与凹模角度完全配合,通过调整上滑块行程就可加工出不同角度的工件。通过采集到的相关参数,换算出机器人的运动控制路线及机床控制系统中的上滑块行程,就可以加工出不同角度的工件。

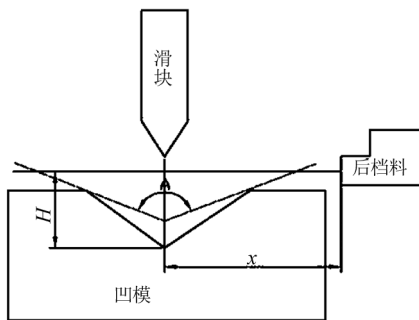


图 1 机器人折弯机基本工作原理

Fig.1 Basic working principle of robot bending machine

### 1.2 机器人折弯过程特征参数提取

根据机器人折弯机的基本原理,其上滑块的弯折行程尺寸如图 2。

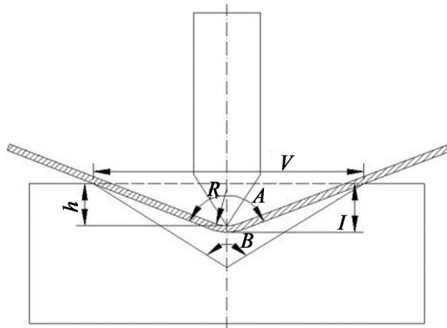


图 2 弯折行程的平面示意图

Fig.2 The plan schematic of bending stroke

图 2 中,  $V$  为凹模的开口宽度;角度  $A$  为理想的弯折角度;  $R$  为弯折后内圆弧的半径;  $h$  为理想的弯折进给行程。设板材的厚度为  $t$ , 根据图上的几何关系及其三角函数可知:

$$H = \frac{V}{2} / \tan\left(\frac{A}{2}\right) \quad (1)$$
$$h = H - (R + t) / \sin\left(\frac{A}{2}\right) - R$$

从公式(1)中可知,滑块的进给行程与理想的弯折角度、凹模的开口宽度、板材的厚度和弯折后内圆弧半径等因数有关。

但是在板材被机器人折弯过程中,金属板材会产生两种变形即塑性变形和弹性变形。由于塑性变形不可恢复,而弹性变形在驱动滑块的液压系统卸荷后会恢复,使得板材折弯的形状和尺寸与理想的变形方向相反,导致板材的弯折精度下降,这一现象称为回弹。可设板材在经过回弹后,弯折角度  $A$  增大为  $A'$ , 并且内圆弧半径也会增大为  $R'$ 。因此,为了折弯精度的提高,需要对公式(1)中的弯折行程  $h$  进行修正。采用回弹系数  $K$  表示折弯件内圆弧中心的角度与回弹前的比值:

$$K = (180 - A') / (180 - A) \quad (2)$$

回弹过程中,板材的弹性变形与弹性模量  $E$ 、屈服极限  $\sigma_b$ 、板材厚度  $t$  及内圆弧半径有关。这些因数之间可由经验公式表示:

$$K = 1 - 3C\delta_b(R + 0.5t) / Et \quad (3)$$

式中,  $C$  为经验系数,与凹模开口宽度和材料厚度的比值有关,一般在 1.1~1.3 之间。将公式(2)和公式(3)结合,可得:

$$A' = 180 - (180 - A) (1 - 3C\delta_b(R + 0.5t) / Et) \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(1),可得到修正后的弯折行程:

$$H = \frac{V}{2} / \tan\left(\frac{A'}{2}\right)$$
$$h = H - (R + t) / \sin\left(\frac{A'}{2}\right) - R$$
$$A' = 180 - (180 - A) (1 - 3C\delta_b(R + 0.5t) / Et) \quad (5)$$

在工件被机器人折弯后,内侧因受压缩短,而外侧受拉伸长。由于拉升和压缩过程是一个非线性的,因而内圆弧的半径  $R$  无法准确确定,但是其在弯折行程的计算中只是一个中间变量,可不作为折弯精度的特征参数。

同时,回弹过程中与所处的环境温度也有关系,一般情况下温度越高,材料的原子间距增大,相互作用力减小,弹性模量降低,因而回弹量则越

大,反之则回弹量越低。

综上所述,在机器人折弯过程中,影响折弯精度的特征参数有弯折的目标角度  $A$ 、材料的厚度  $t$ 、凹模的开口宽度  $V$ 、材料的屈服极限  $\delta_b$ 、材料的弹性模量  $E$  和弯折的环境温度  $T$ 。

## 2 机器人折弯 BP 神经网络的结构设计

根据本研究对象,选取机器人在折弯过程中 6 个特征参数包括目标角度  $A$ 、材料的厚度  $t$ 、凹模的开口宽度  $V$ 、材料的屈服极限  $\delta_b$ 、材料的弹性模量  $E$  以及弯折的环境温度  $T$  作为神经网络的输入,输出结果为折弯的滑块行程  $S$ 。中间隐含层按照经验公式一般选取 2 倍的输入层的神经元数加 1,因此中间隐含层可取 13 个。可建立 6 个输入,13 个中间层神经元,1 个输出的神经网络,其神经网络结构如图 3 所示。

表 1 机器人折弯部分样本数据

Tab.1 Partial sample data of robot bending

序号	目标角度 $A/(^{\circ})$	材料厚度 $t/\text{mm}$	开口宽度 $V/\text{mm}$	屈服极限 $\delta_b/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	环境温度 $\theta/^{\circ}\text{C}$	滑块行程 $S/\text{mm}$
1	90	1.00	16	235	206	25	21.34
2	60	1.20	18	90	72	30	18.44
...	...	...	...	...	...	...	...
600	90	1.80	30	205	206	15	22.30

### 3.2 神经网络的训练

本文采用 Matlab 中的神经网络工具箱对其神经网络进行构建<sup>[5-6]</sup>。在进行神经训练之前,需将机器人折弯样本输入进行归一化处理。而连接各个神经元的权值则在  $[-1,1]$  中,由计算机随机生成。在神经网络训练过程中,选用不同的训练函数其训练收敛的速度不一样。标准 BP 神经网络可对非线性可微分函数进行权值训练,从而实现从输入到输出的任意非线性映射。其主要思想是梯度下降法,通过梯度搜索技术,使得网络的实际输出值与理想输出值的均方差值最小。图 4 是采用梯度下降法的神经网络训练过程图。训练过程中,迭代的学习速率为 0.1,最大次数选择 20 000,训练精度为 0.001。

标准的 BP 算法值按  $t$  时刻误差的梯度下降方向调整,没考虑  $t$  时刻的梯度方向。从而引起

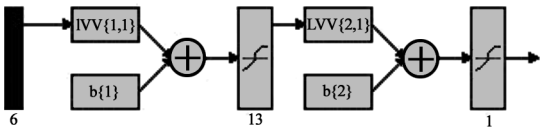


图 3 Matlab 中 6 输入 1 输出的神经网络结构图

Fig.3 Schematic of 6-input 1-output neural network in Matlab

## 3 机器人折弯改进 BP 神经网络的训练

### 3.1 神经网络样本的获取

通过实验建立了 600 组 6 输入 1 输出的机器人折弯神经网络样本,部分样本的数据如表 1。

在 600 个样本中,选取 500 个作为训练样本,剩余的 100 个作为神经网络的验证样本。

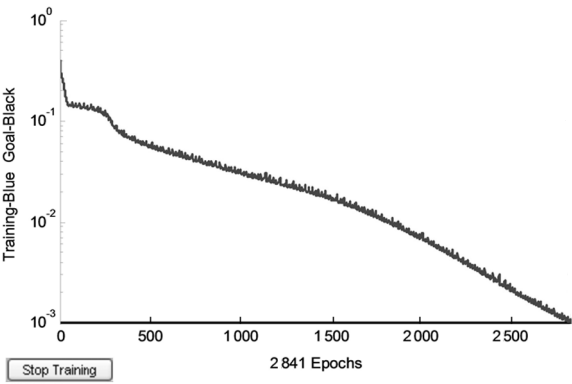


图 4 采用 traingdx 训练函数的标准 BP 神经网络的训练过程

Fig.4 The training process of standard BP neural network by traingdx function

训练过程发生振荡,如图 4 所示,其训练过程中的

误差均方值一直在振荡。主要原因是在训练中，学习新样本时有遗忘旧样本的趋势。

为解决以上问题,可从前一次的权值调整中取出一部分迭加到本次权值调整中,就是在权值调整量中加入动量项,动量项反映了以前积累的调整经验,对于  $t$  时刻调整其阻尼作用。图 5 采用了改进的 traingdx 函数训练方法,训练过程中,迭代的学习速率为 0.1,动量系数为 0.2,最大次数选择 20 000 次,训练精度为 0.001。

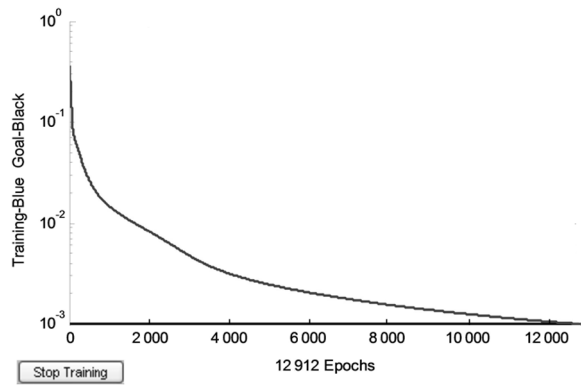


图 5 采用带动量的改进后神经网络训练过程  
Fig.5 The training process of improved neural network with moving amount

图 5 中,虽然训练过程较为平稳,但训练次数达到 12 912 次。为获得更快的收敛速度,并具有更好的泛化能力,引入 Levenberg-Marquardt(即非线性最小二乘算法)。它是利用梯度求最大(小)值,同时具有梯度法和牛顿法的优点。当阻尼系数  $\lambda$  很小时,步长等于牛顿法步长,当  $\lambda$  很大时,步长约等于梯度下降法的步长。图 6 是采用 Levenberg-Marquardt 改进后的神经网络训练图,其训练过程中,迭代的学习速率为 0.1,阻尼系数的初值为 0.01,最大次数选择 20 000 次,训练精度为 0.001。

从图 6 可以看出,采用 Levenberg-Marquardt 在达到相同精度的条件下,其收敛过程平稳,而且迭代次数较少,因此,本文采用 Levenberg-Marquardt 函数作为神经网络的训练函数。

#### 4 机器人折弯改进 BP 神经网络算法的验证

为了验证上述机器人折弯改进算法的神经网络泛化能力,将剩余的 100 组样本作为验证样本,

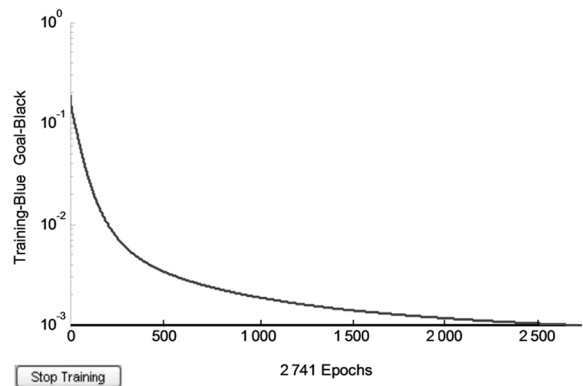


图 6 采用 Levenberg-Marquardt 的改进后神经网络训练过程  
Fig.6 The training process of Levenberg-Marquardt improved neural network

输入到训练好的神经网络,将神经网络的计算值与实测值进行对比,如图 7 所示。

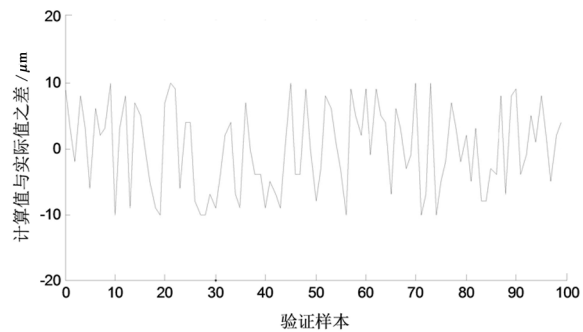


图 7 神经网络的计算值与实际测量之差  
Fig.7 The difference between the calculation result and the measured result of neural network

从图 7 可以看出,机器人折弯 100 个验证样本输入改进算法的神经网络后计算得到的值与实际值基本都在 10  $\mu\text{m}$  以下,满足机器人折弯加工精度要求。结果表明,该改进算法的 BP 神经网络的机器人折弯能够很好地根据弯折的特征参数对滑块的行程进行预测。

#### 5 实验验证

为了能够更加有效地验证所建立的机器人折弯神经网络模型的准确性,根据标准 GB/T 14349—2011《板料折弯机精度》,取两块 3 000 mm×400 mm×2 mm 的 A3 钢板,在同一台安川机器人+东洋工机折弯机上进行 V 形自由 90°折弯。其中一块钢板试件的滑块进给参数采用经验公式计算

得到,另一块钢板试件的滑块进给参数采用神经网络预测得到的数据,然后分别进行折弯。将各自得到的滑块行程输入机器人折弯机中,折弯机根据所输入的数据进行折弯。弯折后,采用万

能角度尺靠在折弯试件的外表面上,从距端部 300 mm 处开始,每隔间隔 200 mm 测量其折弯角度,并对其折弯效果进行对比,其结果如表 2 所示。

表 2 采用经验公式和采用神经网络预测后的机器人折弯角度对比

Tab.2 Robot bending angle comparison between the results obtained by empirical equation and preditted by neural network

测量位置/ mm	采用经验公式后 的折弯角度/(°)	采用神经网络后 的折弯角度/(°)	测量位置/ mm	采用经验公式后 的折弯角度/(°)	采用神经网络后 的折弯角度/(°)
500	89°02′	89°46′	1 700	89°39′	90°06′
700	90°02′	89°48′	1 900	89°16′	89°53′
900	89°31′	90°13′	2 100	89°28′	90°15′
1 100	89°26′	89°51′	2 300	89°46′	89°48′
1 300	90°40′	89°45′	2 500	90°11′	89°45′
1 500	89°25′	90°06′	2 700	89°42′	89°55′

从表 2 可以看出,采用经验公式计算得到的机器人折弯滑块行程后得到的折弯角度的偏差在  $\pm 1^\circ$  以内,而采用经过神经网络预测后的机器人折弯滑块行程得到的折弯角度在  $\pm 20'$  以内。因此,本文采用的改进算法 BP 神经网络预测机器人折弯行程能够提高折弯精度,为工业机器人弯折工艺的发展提供了新的思路,能够推广应用。

以上对比说明,在未来的工业机器人弯折加工过程中,只要采集折弯过程中 6 个特征参数包括目标角度  $A$ 、材料的厚度  $t$ 、凹模的开口宽度  $V$ 、材料的屈服极限  $\delta_b$ 、材料的弹性模量  $E$  以及弯折的环境温度  $T$ ,就可以通过经改进后的神经网络确定所需要的弯折滑块行程,从而不需要人工经

验就可确定滑块行程,不仅提高弯折精度,同时也提高了弯折效率。

6 结论

以机器人折弯的滑块行程为研究对象,对机器人弯折过程中影响弯折精度的特征参数进行分析,提取了 6 个特征参数,在大量试验数据采集的基础上,建立改进算法的 BP 神经网络,并通过对比分析,选择合适的机器人折弯训练函数。经实验验证表明,所采用的改进算法 BP 神经网络预测的机器人折弯滑块行程能够提高折弯角度的精度,为机器人弯折机的发展提供了新的思路。

参考文献:

[1] 魏春雷,徐慧民.冲压工艺与模具设计[M].北京:北京理工大学出版社,2009.  
[2] 李成,许超.基于案例推理的折弯排序方法研究[J].锻压装备与制造技术,2015(3):76-80.  
[3] 徐浩.钣金冲压工艺窍门与钣金件设计制造技术方法及图集典范实用手册[M].长春:银声音像出版社,2005.  
[4] 王涛.自动折弯生产线的研究与开发[D].南京:南京航空航天大学,2014.  
[5] 李克敏,褚建东,刘明哲,等.基于人工神经网络的高碳钢高速线材控冷工艺参数优化[J].钢铁,2000,35(6):37-40.  
[6] 董长虹.Matlab 神经网络与应用[M].北京:国防工业出版社,2005.

(责任编辑:陈雯)