

特种成形

薄壁细长轴自适应校直技术

韩 宾¹, 王肖笛¹, 滕朝斌¹, 李颖慧², 王聚存², 张 琦¹

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002)

摘要: 为提高现有直线度校直设备的检测精度, 提高校直参数计算的准确性, 通过对现有轴类零件校直方法的优、缺点进行分析, 针对常见细长轴零件的直线度校直加工, 设计出校直加工精度为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 的薄壁细长轴零件自适应校直设备总体结构。校直过程基于机器学习的 BP 神经网络算法和数据库积累, 基于三点弯曲校直的基本原理, 此设备确定了一个适用于此校直工艺的 BP 神经网络结构, 其结构为: 输入层为 7 个节点、输出层为 1 个节点、单隐含层为 6 个节点。通过对该神经网络结构的精度验证可得: 当数据库包含 800 组实验数据时, 经过 1 次校直加工, 即可满足精度要求, 此设备可大幅地减少校直加工次数。

关键词: 轴类零件; 自适应校直技术; BP 神经网络算法; 三点弯曲校直; 智能化校直

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.015

中图分类号: TH69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0100-06

Self-adaptive straightening technology of thin-walled slender shaft

Han Bin¹, Wang Xiaodi¹, Teng Chaobin¹, Li Yinghui², Wang Jucun², Zhang Qi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. AECC South Industry Company Limited, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: In order to improve the detection accuracy of existing straightness straightening equipment and improve the calculation accuracy of straightening parameters. The advantages and disadvantages of the existing straightening methods for shaft parts were analyzed. Aiming at the straightness straightening processing of common slender shaft parts, the over structure of a self-adaptive straightening equipment for thin-walled slender shaft parts with the straightening accuracy of $0.1 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ was designed. The straightening process was established based on machine learning consisting of BP neural network algorithm and database accumulation. Based on the basic principle of three-point bending and straightening, a BP neural network structure suitable for this straightening process of this equipment was determined. Its structure is that the input layer has seven nodes, the output layer has one node, and the single hidden layer has six nodes. By verifying the accuracy of the neural network structure, it can be concluded that when the database contains 800 sets of experimental data, the accuracy requirements can be met after one straightening process. This equipment can greatly reduce the numbers of straightening.

Key words: shaft parts; self-adaptive straightening technology; BP neural network algorithm; three-point bending straightening; intelligent straightening

薄壁细长轴作为高精密回转零件, 具有严格的外圆跳动和壁厚差要求。在深孔钻精加工的过程中, 由于刀片与引导间隙、进给、转速、冷却油压等综合因素的影响, 内孔直线度容易超出工艺尺寸范围, 此时须对薄壁细长轴进行校直, 保证内孔直线度在合格范围内, 以保证零件的壁厚差要求。此外, 在

外型面精车加工后, 由于残余应力释放, 容易发生弯曲变形, 需安排校直工序对零件进行弯曲校直, 以保证零件的外圆跳动要求。目前, 国内校直机多为通用设备, 无法实现智能校直工艺。现有的校直设备采用普通液压式装置, 根据操作者经验进行压力加载校直, 校直压力不够且压力大小不可控, 容易造成欠加载或过加载; 缺少校直数据库, 无法实现精度校直。并且由于材料存在弹性回复, 通常需要经过多次校形才能达到校直效果, 需耗费大量的时间和人力成本。为解决上述问题, 本文研发了一种针对薄壁细长轴的自适应校直技术, 减少了人工干预, 从而避免人工误差、节约人工成本、减少校

收稿日期: 2020-12-20; 修订日期: 2021-03-18

基金项目: 西安交通大学校企合作科研项目 (N-20010394)

作者简介: 韩 宾 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: hanbingghost@mail.xjtu.edu.cn

通信作者: 张 琦 (1978-), 男, 博士, 教授

E-mail: henryzhang@mail.xjtu.edu.cn

直次数、缩短校直时间、提高校直稳定性、改善校直精度, 实现了智能校直。

1 校直系统结构

本文选用三点弯曲的校直基本原理(图1), 即2个支撑点、1个压点, 对发生弯曲的零件部分进行反向压弯, 最终使反弯塑性变形量等于弯曲量, 达到校直目的。

根据上述校直原理, 本文所设计的薄壁细长轴自适应校直设备的总体结构如图2所示, 由机械结

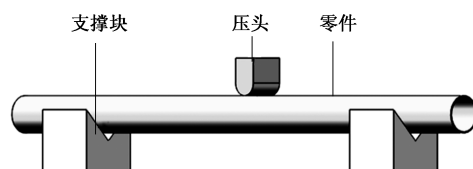


图1 三点弯曲法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-point bending method

构和控制系统两部分组成。设备主要包括伺服电机、减速机、传动模组、滑块、连接法兰、压头、距离传感器、机架、支撑块、双向模组等。设备的三维图及实物照片如图2a和图2b所示。

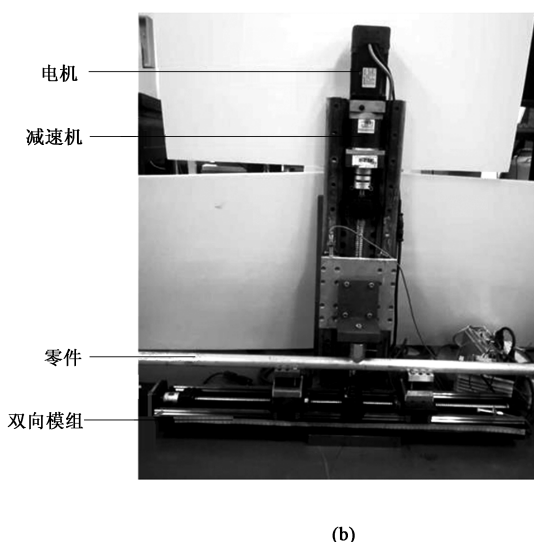
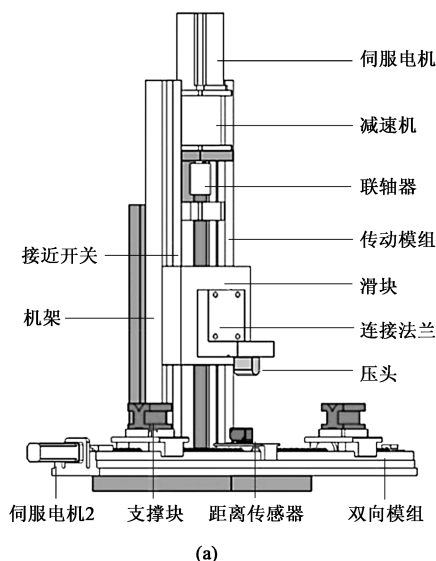


图2 校直设备三维图(a)及实物照片(b)

Fig. 2 3D diagram (a) and physical photo (b) of straightening equipment

伺服电机1是进行反弯校直的动力源, 伺服电机2控制支撑块到达指定位置。零件安装在设备支撑块上, 并使零件最大弯曲点正对压头, 零件弯曲方向向上。校直系统的工作流程如图3所示。下压前, 距离传感器第1次测量到零件下表面的距离, 当零件被压弯量等于校直下压量时, 压头上升; 距离传感器第2次测量到零件下表面的距离, 并与第1次测量值作差, 即得到此次校直加工的塑性变形量。将最初误差值与塑性变形量作差, 得到残余变形量。当残余变形量满足精度要求时, 则完成校直加工; 否则根据残余变形量重新计算下压量, 重复上述过程, 直至残余变形量满足精度要求。

控制系统主要包含两部分: 硬件部分和软件部分。硬件部分主要完成电机控制, 距离传感器数据采集; 软件部分主要完成下压量和残余变形量的计算, 判断是否满足精度要求, 实现与PLC通讯的数

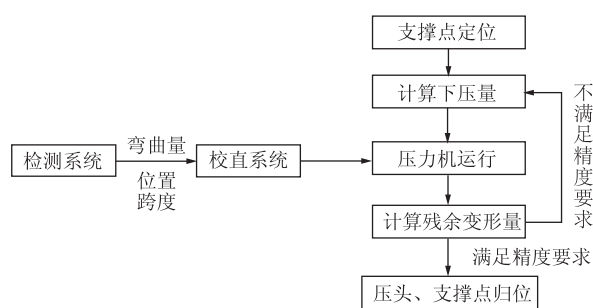


图3 校直系统工作流程图

Fig. 3 Flow chart of straightening system

据交换。控制系统主要包括直线度校直软件、控制硬件、硬件程序。

2 自适应校直技术

三点弯曲校直工艺的参数有3个: 压点位置、

支撑跨度、下压量。对于该工艺方法,校直精度主要取决于校直参数,因此,如何合理、准确地计算三点弯曲校直工艺参数成为本文研究的关键问题^[1-10]。

压点位置根据材料力学挠度计算公式确定,应在零件弯曲量最大位置附近;支撑跨度是指两个支撑点之间的距离数值;下压量可由校直行程进行计算,具体的校直行程确定方法目前主要有 3 种:基于弹塑性理论的方法、基于有限元仿真计算的方法、基于经验公式计算的方法。

基于弹塑性理论的方法计算精度有限,有些参数不易测量;基于有限元仿真计算的方法需要高配置计算机,需要大量繁琐的处理工作;基于经验公式计算的方法,公式难以获得。综上所述,对于确定三点弯曲校直工艺参数,其中压点位置、支撑跨度已经有了明确方法,但目前下压量的计算方法仍无法满足精度要求,因此,本文提出一种利用神经网络计算三点弯曲校直下压量的方法,以提高计算精度。基于 BP 神经网络的自适应校直技术具有良好的自适应性和自学习性,可以对薄壁厚不均匀或有缺陷薄壁细长轴进行自适应校直,使其满足精度要求。

2.1 BP 神经网络算法

本文采用 BP 神经网络^[11]实现自适应校直。BP 神经网络具有自适应强、自学习性和巨量并行性的特点,具有高度非线性映射能力,在任何闭区间内的连续函数都可以用 3 层网络实现任意维数的非线性映射。基于 BP 神经网络数据计算算法,其建模过程主要包括 BP 神经网络构建、BP 神经网络训练、BP 神经网络预测 3 步^[12],算法流程图如图 4 所示。

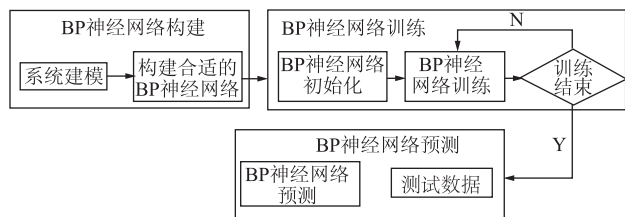


图 4 BP 神经网络算法流程图

Fig. 4 Flow chart of BP neural network algorithm

2.2 BP 神经网络构建

BP 神经网络包含 3 个部分:输入层、隐含层、输出层。其结构是根据输入、输出特点确定的,根据本文采用的三点弯曲校直工艺具体参数^[13-14],设置输入层为 7 个节点、输出层为 1 个节点。其中,

输入层参数设置为弹性模量、泊松比、内径、外径、屈服强度、弯曲量、支撑跨度 7 个节点,输出层参数设置为下压量 1 个节点。隐含层层数、隐含层节点数、隐含层传递函数、输出层传递函数、学习效率等参数均会影响 BP 神经网络的计算精度,为确定合理的参数,进行以下讨论验证。

(1) 隐含层层数设置

根据隐含层层数,可以分为单隐含层和多隐含层。多隐含层由多个单隐含层组成,与单隐含层相比,多隐含层的泛化能力更强,更适用于复杂模型,但是训练时间较长,可能存在过度拟合的问题。因此,隐含层层数的选择要根据系统的复杂程度、预测精度和训练时间综合考虑。为确定单隐含层和多隐含层哪个更适用于本文研究,下面进行验证实验。

构建 3 个 BP 神经网络模型,其中网络 1 为单隐含层,网络 2 为双隐含层,网络 3 为三隐含层,其余结构、参数完全一致。以前期 n 组实验数据的前 $(n-6)$ 组为训练数组,后 6 组为验证数据,比较 5 次预测误差平均值,结果如表 1 所示。

表 1 BP 神经网络预测结果比较

Table 1 Comparison of prediction results by BP neural network

| 网络类别 | 预测误差百分比/% | 运行时间/s |
|------|-----------|--------|
| 单隐含层 | 1.12 | 6 |
| 双隐含层 | 4.69 | 9 |
| 三隐含层 | 4.44 | 10 |

由表 1 中数据可知,单隐含层预测误差百分比较小,所用时间较短,而双隐含层和三隐含层预测结果较差。说明本文研究的系统模型比较简单,采用多隐含层时,产生过度拟合,导致预测结果偏差较大。因此,本文采用单隐含层结构。

(2) 隐含层节点数设置

隐含层节点的数量对于 BP 神经网络的计算精度具有较大的影响:节点数太少,BP 神经网络不能很好地学习,BP 神经网络不能构建复杂的映射关系,导致计算结果与实际值偏差较大,需要增加训练次数,且训练精度也受影响;节点数太多,则会导致训练时间过长,甚至出现网络过度拟合现象,导致计算结果不准确。因此,本文验证计算不同隐含层节点数对计算精度的影响,以获得最合理的节点数。具体方法为:以前期 n 组实验数据前 $(n-6)$ 组为训练样本,后 6 组为验证数据,比较 5 次预测误差平均值,计算结果如表 2 所示。

表 2 不同隐含层节点数对计算精度的影响

Table 2 Influence of different hidden layer nodes on calculation accuracy

| 隐含层节点数/个 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 预测误差百分比/% | 1.080 | 0.980 | 0.510 | 0.520 | 0.596 | 1.230 | 1.630 |

由表 2 中数据可知，随着隐含层节点数的增多，预测精度呈现先减小后增大的趋势，当隐含层节点数为 6 时，预测精度最高，预测误差百分比为 0.51%。因此，本文隐含层节点数确定为 6 个。

(3) 学习效率设置

学习效率是 BP 神经网络的一个关键参数。学习效率较大时，可能导致学习结果不精细，计算误差较大；学习效率较小时，学习时间较长，效率差，甚至可能出现过度学习现象，导致计算精度变差。因此，为了合理确定学习效率数值，本文进行相应的实验验证，具体方法为：以前期 n 组实验数据的前 $(n-6)$ 组数据为训练数组，后 6 组为验证数据，比较 5 次预测误差平均值，计算结果如表 3 所示。

表 3 不同学习效率对计算精度的影响

Table 3 Influence of different learning rates on calculation accuracy

| 学习效率值 | 0.001 | 0.01 | 0.1 | 1 | 10 | 100 |
|-----------|-------|------|------|------|------|------|
| 预测误差百分比/% | 0.68 | 0.88 | 0.45 | 0.49 | 1.08 | 1.11 |
| 时间/s | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |

由表 3 可知，随着学习效率值的逐渐增大，预测误差百分比呈现先减小后增大的趋势，计算时间没有变化。说明当学习效率为 0.01 和 0.001 时，BP 神经网络发生了过度学习，导致计算精度不增反降；当学习效率为 10 或 100 时，学习过程不够精细，导致预测误差较大。由于本文研究的模型较为简单，输入、输出节点数和学习样本数据量较少，影响学习时间的主要因素不是学习效率，因此，不同学习效率时的学习时间是相同的。因此，本文设置 BP 神经网络的学习效率为 0.1。

(4) 其他参数设置

其他参数设置，其中反向传播网络的训练函数设置为梯度下降训练函数 Traingdx，反向传播网络的权值（阈值）学习函数设置为带动量项 BP 学习规则 Learngdm，训练次数 $epochs = 1000$ ，目标精度 $goal = 10^{-8}$ ，最大失败次数 $max_fail = 500$ 。

基于以上方法，本文构建了一个输入层为 7 个节点、输出层为 1 个节点、单隐含层为 6 个节点的

BP 神经网络结构，目标精度为 10^{-8} ，学习效率为 0.1，具体网络结构如图 5 所示。其中， $X_1 \sim X_6$ 为单隐含层的 6 个节点。

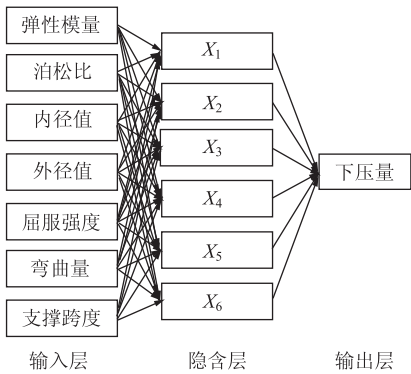


图 5 BP 神经网络结构

Fig. 5 Structure of BP neural network

3 实验研究

3.1 最大校直压力验证

根据设计要求，本设备可产生的最大下压力应不小于 20 kN，校直设备的最大压力关系到可加工零件的最大尺寸。因此，有必要测试设备所能产生的最大压力。具体实验方案为：在连接法兰下安装一个压力传感器，并通过数据采集卡及数据采集软件实时采集压力传感器信号，控制连接法兰下压至压力传感器表面，直至电机出现堵转现象为止，获得设备最大压力。通过数据采集软件，获得下压过程中压力数值的原始数据，绘制压力值与时间之间的关系曲线图，如图 6 所示。由图 6 可知，随着压头的下压，压力值不断增大，当伺服电机完全堵转后，压力值基本稳定在 20 kN 左右，其中最大值为 20.92 kN，即校直系统的最大压力值为 20 kN，满足设计要求。

此处得到的实际压力值与理论计算值存在偏差，因为伺服电机在实际校直加工时，电机转速不能达到额定转速 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。因此，电机实际功率低于 0.75 kW，压力机产生的实际压力值小于理论计算值。

3.2 支撑块定位精度实验

支撑跨度是三点弯曲校直工艺的重要参数。当

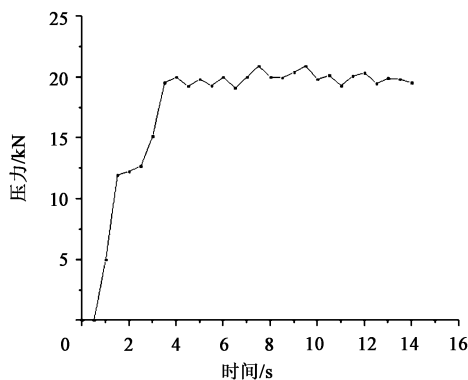


图6 压力机最大下压力

Fig. 6 Maximum down pressure of press

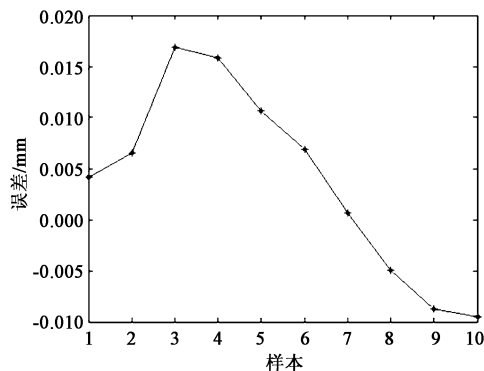


图7 BP神经网络算法误差

Fig. 7 Errors of BP neural network algorithm

下压力一定时，支撑跨度的大小直接影响校直精度和校直次数。因此，必须对支撑块定位精度进行验证，具体方法为：设置软件系统分别发送的支撑跨度为300、350、400和450 mm；然后，控制电机带动双向模组上两支撑块，利用游标卡尺测量支撑块之间的距离，得到实际跨度值，具体数值如表4所示。

表4 支撑块定位精度 (mm)

Table 4 Positioning accuracy of support block (mm)

| 设置跨度值 | 实际跨度值 | 误差值 |
|-------|--------|------|
| 300 | 300.22 | 0.22 |
| 350 | 349.70 | 0.30 |
| 400 | 400.25 | 0.25 |
| 450 | 449.85 | 0.15 |

由表4数据可知，支撑块定位的最大误差值为0.30 mm，总体分布在0.15~0.30 mm之间，相对于支撑跨度值误差较小，且误差分布没有规律，说明误差值没有随着跨度值的增加而累积，伺服电机控制参数设定合理。满足使用要求。

3.3 BP神经网络计算精度验证

利用以上构建的BP神经网络结构，取前期 n 组实验数据的前 $(n-10)$ 组作为训练样本，取后10组数据作为验证样本。利用上述训练好的BP神经网络，导入后10组数据的输入值进行计算，并将计算结果与实际值做比较，得到计算误差如图7所示。BP神经网络的计算误差最大值为0.0169 mm，整体在-0.0095~0.0169 mm之间，可见计算精度较高，满足实际使用要求。

校直次数与数据库样本量的关系如图8所示。

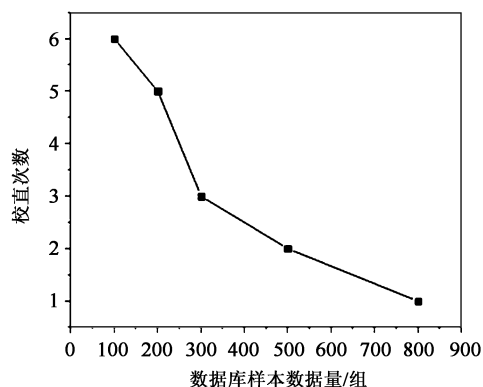


图8 校直次数与数据库样本量的关系

Fig. 8 Relationship of straightening numbers and sample sizes for database

由图8可知，随着数据库样本数据量的增加，校直次数越来越少。当数据库样本数据量 n 为500组时，2次校直即可满足精度要求；当数据库样本数据量 n 为800组时，1次校直即可满足精度要求。可见随着数据库样本数据量的增多，BP神经网络计算下压力的精度越来越高，最终实现1次校直即可满足精度要求。说明本设备采用BP神经网络计算下压力的方法能够有效地提高计算精度，减少校直次数，从而提高校直效率。

4 结论

(1) 针对小弯曲量细长轴零件，根据三点弯曲校直原理，设计出加工精度为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$ 的智能校直设备的总体结构，主要包括机械结构和控制系统两部分。控制系统主要包含硬件部分和软件部分。其中，软件系统能够调用BP神经网络计算校直下压力，控制设备运行，自动判断是否满足精度要求。

(2) 研究了BP神经网络主要参数对计算精度

的影响,最终确定了一个适用于本校直工艺的BP神经网络结构,其结构为:输入层为7个节点、输出层为1个节点、单隐含层为6个节点。且进行了精度验证实验,结果表明:最大计算误差值为0.0169 mm,满足精度要求。

(3) 进行了智能校直设备性能验证实验,结果表明:设备最大压力值为20.92 kN,支撑跨度定位精度最大误差值为0.3 mm,满足使用要求。

(4) 对BP神经网络计算精度进行了验证,随着数据库样本数据量的增多,精度越来越高。当数据库样本数据量 n 为800组时,经过1次校直加工即可满足精度要求。表明采用BP神经网络计算校直下压量的方法,能够改善下压量计算的精度,减少校直次数。

参考文献:

- [1] 范永海,郑树清. 齿轮轴校直理论及实验研究[J]. 机械设计与制造, 2006, (4): 99-101.
Fan Y H, Zheng S Q. Study on the gear shaft straightening theory [J]. Mechanical Design & Manufacturing, 2006, (4): 99-101.
- [2] 翟华. 台阶轴校直工艺计算方法及实验研究[J]. 机械强度, 2002, 24 (3): 388-390.
Zhai H. Research on stepped shaft straightening technology theory and experiment [J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24 (3): 388-390.
- [3] 朱双霞,李骏. 压力校直下压量计算方法的比较分析[J]. 新余学院学报, 2010, 15 (4): 76-78.
Zhu S X, Li J. Comparative analysis of pressure arithmetic under pressure straightening alignment [J]. Journal of Xinyu University, 2010, 15 (4): 76-78.
- [4] Zhao J, Song X K. Control strategy of multi-point bending one-off straightening process for LSAW pipes [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72 (9-12): 1615-1624.
- [5] Ma L F, Ma Z Y, Jia W T, et al. Research and verification on neutral layer offset of bar in two-roll straightening process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79 (9-12): 1519-1529.
- [6] Jin C X, Yu T T. Research on monitoring and early warning of our manufacturing industrial security based on BP neural network [J]. Journal of Beijing University of Technology: Social Science Edition, 2010, (6): 59-62.
- [7] Zhan P P, Zhao J, Li P, et al. Three steps control strategy of over-bending setting round for pipe-end of large pipes [J]. Materials Science and Technology, 2014, 22 (2): 97-103.
- [8] 翟华,韩春明,柯尊忠. 罗拉轴校直工艺理论及实验研究[J]. 纺织学报, 2002, 23 (4): 68-69.
Zhai H, Han C M, Ke Z Z. Research on roller shaft straightening technology theory and experiment [J]. Journal of Textile Research, 2002, 23 (4): 68-69.
- [9] 周里群. 轴的校直及校直载荷计算[J]. 机械设计与制造, 2001, (6): 54-55.
Zhou L Q. Shaft straightening and straightening load calculation [J]. Mechanical Design & Manufacturing, 2001, (6): 54-55.
- [10] 弓海霞,闫通海,王进礼. 钻具校直的理论研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23 (3): 116-119.
Gong H X, Yan H T, Wang J L. Straightening of drill pipe [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23 (3): 116-119.
- [11] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Han L Q. Artificial Neural Network Theory, Design and Application [M]. The 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [12] 王小川,史峰,郁磊,等. MATLAB神经网络43个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
Wang X C, Shi F, Yu L, et al. Analysis of 43 Cases of MATLAB Neural Network [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2013.
- [13] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [A]. Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation [C]. Orlando, FL, USA: IEEE, 1997.
- [14] Jin J L, Wei Y M, Zou L L, et al. Forewarning of sustainable utilization of regional water resources: A model based on BP neural network and set pair analysis [J]. Natural Hazards, 2012, 62 (1): 115-127.

新资讯
新营销
新媒体



《QC检测》神页



《机加工》神页



QC检测仪器—公众号



天下机械—公众号

天下机械网 www.qctms.cn
QC检测仪器网 www.qctest.com

【神页: 扫码直接阅读、
收藏、下期自动更新。】