

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2002989

测距传感器性能评估与故障诊断方法研究\*

田宇<sup>1,2</sup> 高强<sup>1,2</sup> 李栋<sup>1,2</sup> 毛泽民<sup>1,2</sup> 李智<sup>1,2</sup> 田禾<sup>1,3</sup>

(1. 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室 天津 300384; 2. 机电工程国家级实验教学示范中心 天津 300384;  
3. 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室 天津 300384)

**摘要:**针对工业生产系统中传感器由于长期处于恶劣环境下,导致传感器易失效的问题,提出了一种基于标准不确定度的传感器性能评估和故障诊断方法。以方矩管生产过程为研究对象,首先,通过硬件测试实验选用磁栅尺和编码器作为测距传感器,研究并设计了轧辊位置自动调整系统,将轧辊定位精度提高至 $\pm 1\text{ mm}$ 以内;然后,利用小波滤波对传感器输出序列进行去噪处理,并结合神经网络进行输出序列预测;最后,利用预测值与实际测量值的残差计算标准不确定度,通过判断不确定度大小实现测距传感器故障诊断,以及对测距传感器实时性能的评估。通过模拟精度下降故障传感器实验表明,该方法故障检测准确率可达 90% 以上,表明该方法的有效性。

**关键词:**测距传感器;不确定度;故障诊断;神经网络;小波去噪

**中图分类号:** TP273+. 2      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510. 8040

Research on performance evaluation and  
fault diagnosis methods of distance sensors

Tian Yu<sup>1,2</sup> Gao Qiang<sup>1,2</sup> Li Dong<sup>1,2</sup> Mao Zemin<sup>1,2</sup> Li Zhi<sup>1,2</sup> Tian He<sup>1,3</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems, Tianjin 300384, China;  
2. Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education, Tianjin 300384, China;  
3. Tianjin Key Laboratory of Electromechanical System Design & Intelligent Control, Tianjin 300384, China)

**Abstract:**In order to deal with the problem that sensors in industrial production systems are prone to failure due to long-term exposure to harsh environments, a new method of sensor performance evaluation and fault diagnosis based on standard uncertainty is proposed. Taking the production process of square-tube as the research object, firstly, the magnetic scale and encoder are chose as the distance measuring sensor through the hardware test experiment, and the automatic adjustment system of the roll position is studied and designed, the roll positioning accuracy is improved within  $\pm 1\text{ mm}$ . Then, wavelet filtering is used to denoise the output sequence of the sensor, and the neural network is combined to predict the output sequence. Finally, the standard uncertainty is calculated by the residual of the predicted value and the actual measured value, the fault diagnosis of the ranging sensor and the evaluation of the real-time performance of the ranging sensor are realized by judging the size of the uncertainty. Simulation experiments on the faulty sensor with accuracy decrease showed that the fault detection accuracy of this method can reach more than 90%, and the proposed method is effective.

**Keywords:**ranging sensor; uncertainty; fault diagnosis; neural work; wavelet denoise

0 引言

冷弯空心型钢主要有两种生产方式,圆成方和直接成方<sup>[1]</sup>。目前,直接成方已逐渐成为我国空心型管的主

要生产方式。虽然直接成方具有成型道次少、节约材料、能耗低、经济效益好等优点<sup>[1-2]</sup>。但调整时间长、轧辊位置调整精度差等问题是直接成方的难以获得高质量产品的主要原因<sup>[3-4]</sup>。对于上述问题,通过搭建控制系统自动调节轧辊位置可缩短调整时间,在此基础上利用测距传

传感器反馈轧辊位置信息,能够极大提高轧辊位置调整精度。Gao 等<sup>[5]</sup>以可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)和拉绳位移传感器为核心构建自动控制系统,有效缩短了方矩管生产线的调整时间并提升了轧辊位置调整精度。但随着使用时间的增长,测距传感器受到实际工业环境中存在大量的水、油及高频干扰,故障率不断提高,严重影响了正常生产。

对此,许多学者进行了有关传感器的故障检测方面分析和研究<sup>[6-8]</sup>。韩军等<sup>[9]</sup>利用内置传感器,以数控机床伺服进给系统为研究平台,建立了无传感器信息与故障的关联模型。但该方法泛化能力差且难以在线应用。王璐瑶等<sup>[10]</sup>提出采用长短期记忆网络(LSTM)对空调系统中温度传感器进行故障诊断;夏金辉等<sup>[11]</sup>利用解析冗余的方法对整流器传感器进行故障分析;张珂等<sup>[12]</sup>提出采用二分法优化核矩阵选择,并利用改进的核主成分分析(KPCA)方法对电主轴系统进行故障检测;Wu 等<sup>[13]</sup>利用 LSTM 循环神经网络,通过预测传感器输出时间序列对航天发动机进行了故障检测。不过这些方法都是针对传感器发生故障后进行检测,而忽略了传感器性能往往是逐渐变差的,没有在传感器发生故障前进行有效的性能评估。

一方面为提高企业生产效率,本文首先以测距传感器为核心,结合 PLC 和现场总线技术设计了轧辊位置自动控制系统,节省生产过程中设备调整时间;另一方面为保证系统能够稳定、可靠地运行,本文利用神经网络对传感器输出的实时值进行预测,以重复性标准不确定度作为传感器性能的评估指标,监测传感器的运行状态,该方法能够在故障发生前实时评估传感器性能,以及时检测和排除故障。

# 1 基础理论

## 1.1 硬件冗余法

工业现场应用时,为了保障系统安全,需要及时有效地进行传感器故障检测,另外,为了提高系统效率、增加鲁棒性,当传感器出现故障后,也需要冗余硬件作为替代。这种硬件冗余的方法很早就被提出并广泛采用,核心思想如图 1 所示。

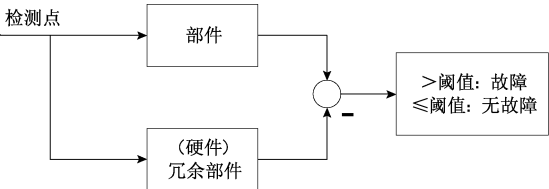


图 1 硬件冗余方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hardware redundancy method

硬件冗余方法的局限性在于只能在传感器检测到故障时发出故障信号,提醒操作者及时采取措施;而在传感器性能逐渐变差,但未达到故障限时,该方法无法对传感器传输信息的有效度做出评估。而轧辊位置自动调整系统中,传感器受恶劣的环境影响,导致精度下降故障频繁发生,这种故障相比于固定偏差、漂移偏差和完全失效等常见故障更难检测。

## 1.2 时间序列预测方法

时间序列预测法本质上是满足基本假设下的一种回归预测方法。该方法基于事物发展的连续性、可知性和可预测性,根据过去的时间序列数据对未来进行推测。对于传感器而言,其输出的测量值正是时间序列数据,对同一过程的测量值应满足一定的规律性,可根据历史输出序列进行预测。

# 2 系统故障诊断实验

## 2.1 冷弯型钢生产过程系统设计

### 1) 测距传感器选型

传感器作为自动控制系统中重要的组成部分,承担着获取信息的任务,传感器的故障可能毁坏整个控制系统甚至造成整个生产过程的瘫痪。对于轧辊位置自动调整系统,选型时应充分考虑测距传感器实际的工作环境、安装条件、精度要求等因素。

实际工业现场条件下,测试并记录了多种测距传感器实际输出值,并以输出值的准确性作为衡量指标。输出值的准确率通过式(1)计算。

$$\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi(t)$$

(1)

其中,某一时刻输出值的准确率  $\varphi(t)$  通过式(2)计算。

$$\varphi(t) = 1 - \frac{|x_m(t) - x_r(t)|}{x_r(t)} \times 100\%$$

(2)

式中:  $x_m$  表示测量值;  $x_r$  表示实际值。

各测距传感器的测试及筛选结果如表 1 所示。

表 1 测距传感器筛选结果

| Table 1 Range sensor screening results |       |          |
|----------------------------------------|-------|----------|
| 测距传感器类型                                | 准确率/% | 是否适合现场应用 |
| 超声波测距传感器                               | 86.1  | ×        |
| 激光测距传感器                                | 93.3  | ×        |
| 红外测距传感器                                | 94.1  | ×        |
| 拉绳式测距传感器                               | 99.5  | ×        |
| 磁栅尺                                    | 99.9  | ✓        |
| 增量式旋转编码器                               | 99.9  | ✓        |

前 3 种测距传感器输出值准确率较低,以超声波测距传感器为例,分析其产生原因。超声波测距传感器采

用超声波回波测距原理,通过检测渡越时间,即从超声波发射至接收到超声波回波的时间,检测传感器与目标物之间的距离。但工业现场的工作空间狭窄而且反射表面粗糙,该传感器的实际应用条件有限。另外,由于水流影响,发射的声波信号会受到水流阻挡而提前返回导致测距不准。

拉绳式测距传感器虽然准确率较高,但其本身防水性差,随着使用时间的增长,精度下降十分明显,故不适合现场使用。

综合勘察现场情况,选用磁栅尺作为测距传感器,其具有防水、防油、安装空间小的特点,适用于该工业现场环境<sup>[14]</sup>。磁栅尺传感器结构如图 2 所示。其中,磁头型号 MSR5000,为高密封防尘型,分辨率 20 μm,输出形式为高速计数脉冲,外形尺寸 30 mm×50 mm×10 mm,适合安装在狭小环境中,现场测量范围在 500 mm 以内。

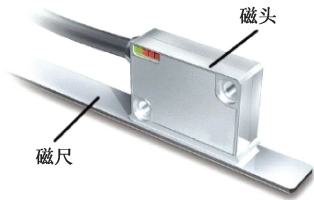


图 2 磁栅尺传感器结构  
Fig. 2 Magnetic scale sensor structure

除了磁栅尺之外,增量式旋转编码器的输出值也具有较高的准确率,同样适用于现场完成测距功能。编码器将角位移转换成电信号,当其与被测物通过法兰盘、联轴器连接后,可以直接测量被测物的角位移<sup>[15]</sup>。根据现场情况,三相异步电机传动轴的突出部分适合安装,该位置位于机壁外,没有水和油污。满足编码器对于工作环境的要求。

2) 冗余系统设计

根据表 1 的硬件筛选结果,选用增量式旋转编码器作为磁栅尺的冗余部件。整个系统的硬件结构如图 3 所示。

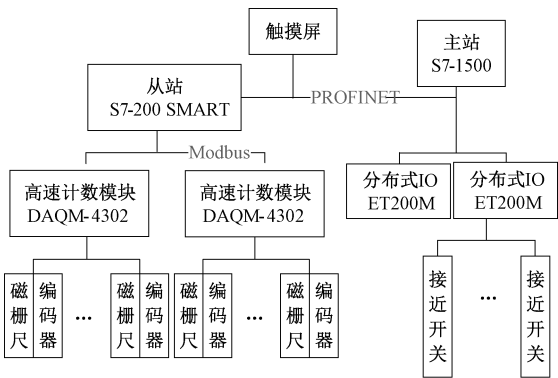


图 3 系统硬件结构  
Fig. 3 System hardware structure

该系统以 PLC 为核心,选用西门子 S7-1500PLC 作为主站控制器,选用西门子 S7-200SMART 作为从控制器,分别完成对电机的顺序控制和对多个传感器的数据采集,主从 PLC 之间采用 PROFINET 总线通信,完成数据交换<sup>[16]</sup>。磁栅尺和编码器两种测距传感器输出信号均为 A/B 相脉冲信号,采用 DAQM-4302 高速计数采集模块对数据进行采集;选用欧姆龙接近开关标定零点位置。

利用 SIMATIC STEP7 V15 完成 PLC 程序的编写及人机交互界面的设计,实现逻辑控制、历史数据的存储分析、报警等功能<sup>[17]</sup>。软件整体结构如图 4 所示。

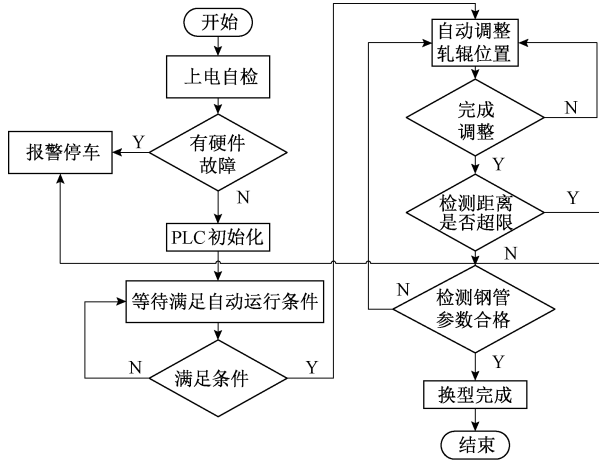


图 4 PLC 控制软件流程  
Fig. 4 PLC control software flow chart

2.2 传感器故障诊断方法

本文在冗余系统的基础上,选取标准不确定度作为传感器性能评估指标,通过传感器标准不确定度的变化来检测是否发生精度下降故障。首先,采用小波滤波去噪与神经网络相结合的方法,利用历史数据对测距传感器的下一步输出值进行预测;然后,利用预测值与实际值的残差计算传感器的标准不确定度。该方法原理如图 5 所示。

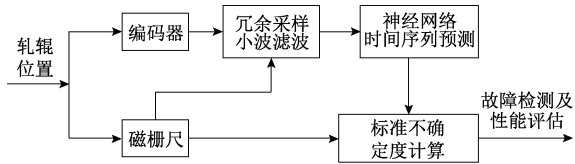


图 5 传感器性能评估原理  
Fig. 5 Principle of sensor performance evaluation

1) 小波去噪方法

测距传感器的输出信号中常存在噪声,多是由机械振动和高频干扰引起,数据波动较大,若直接输入到神经网络中会对预测准确性产生较大影响,所以首先要利用

小波函数对输出信号进行滤波处理<sup>[18]</sup>。

小波去噪过程分为 3 步,为小波变换、阈值处理和小波重构,主要涉及小波基的选择、阈值及阈值函数的选取和分解层数的选择。除以上参数外,信号采样频率对去噪效果会产生较大影响。

根据经验,选取 BayesShrink 阈值,  $Q\text{-Value} = 0.05$ , 软阈值函数。提取生产线动态过程的测距传感器数据进行实验,测试不同的参数下的小波去噪效果。对于去噪效果好坏的评价,采用信噪比(SNR)与估计信号同原始信号的均方根误差(RMSE)来判断,SNR 值越高、RMSE 值越低,代表有效信号比例越高,去噪效果越好。选择不同采样频率分别进行实验,表 2 为采样频率 1 Hz 的实验结果,表 3 为采样频率 10 Hz 的实验结果。

表 2 1 Hz 去噪效果对比

| Table 2 Comparison of 1 Hz denoising effects |      |          |         |
|----------------------------------------------|------|----------|---------|
| 小波函数                                         | 分解层数 | SNR      | RMSE    |
| db4                                          | 6    | 57.513 6 | 0.017 9 |
| db4                                          | 10   | 58.637 5 | 0.017 9 |
| db8                                          | 6    | 58.334 8 | 0.016 2 |
| db8                                          | 10   | 59.704 6 | 0.016 2 |
| sym4                                         | 6    | 58.435 6 | 0.017 1 |
| sym4                                         | 10   | 59.495 8 | 0.017 1 |
| sym8                                         | 6    | 60.803 2 | 0.014 8 |
| sym8                                         | 10   | 61.030 0 | 0.014 8 |
| coif4                                        | 6    | 59.220 4 | 0.018 8 |
| coif4                                        | 10   | 60.923 4 | 0.018 8 |

表 3 10 Hz 去噪效果对比

| Table 3 Comparison of 10 Hz denoising effects |      |          |         |
|-----------------------------------------------|------|----------|---------|
| 小波函数                                          | 分解层数 | SNR      | RMSE    |
| db4                                           | 9    | 68.978 3 | 0.004 3 |
| db4                                           | 15   | 70.541 7 | 0.004 3 |
| db8                                           | 9    | 69.475 9 | 0.004 2 |
| db8                                           | 15   | 70.939 7 | 0.004 2 |
| sym4                                          | 9    | 67.877 9 | 0.005 3 |
| sym4                                          | 15   | 69.999 9 | 0.005 3 |
| sym8                                          | 9    | 68.800 7 | 0.003 9 |
| sym8                                          | 15   | 71.177 0 | 0.003 9 |
| coif4                                         | 9    | 69.011 5 | 0.003 7 |
| coif4                                         | 15   | 71.194 2 | 0.003 7 |

根据实验结果,当采用频率为 10 Hz,选取 sym8 小波,分解层数为 15 层时可以获得最好的去噪效果。

2) 基于自适应线性神经网络的时间序列预测方法  
去噪后的传感器输出时间序列能更准确地反映测量真实值的变化规律,自适应线性神经网络采用 TDL 延迟链将其作为输入,即通过当前及过去  $m$  个时刻的传感器输出信号  $x(n-m+1), x(n-m+2), \dots, x(n)$ , 预测  $m+1$  时刻的传感器输出值  $x(n+1)$ , 神经网络结构如图 6

所示<sup>[19]</sup>。

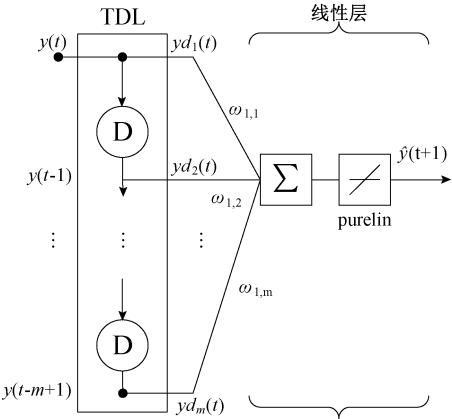


图 6 引入 TDL 延迟链的线性自适应神经网络结构

Fig. 6 Linear adaptive neural network structure introducing TDL delay chain

由图 6 可知,自适应线性神经网络结构简单,仅需计算  $\omega_{1,1}, \omega_{1,2}, \dots, \omega_{1,m}$  共  $m$  个权值,收敛速度快,能够满足实际系统运行时对实时性的要求。

3) 性能评估与故障诊断方法

将预测值与测量值之差代入式(3)中,可以计算得出标准不确定度,该指标能够反映传感器的主导运行性能。传感器的标准不确定度常用测量数据的标准差表示,其值由最大误差法确定,计算公式如下:

$$u(y) = s(y) = \hat{\sigma} = \frac{1}{k_n} |\delta_i|_{\max}$$

(3)

式中:  $y$  为传感器输出时间序列;  $s(y)$  为单次测量样本标准差;  $\hat{\sigma}$  为总体标准差  $\sigma$  的估计值;  $u(y)$  为单次测量的标准不确定度;  $\delta_i$  为独立测量值与被测真值的差;  $k_n$  为误差法系数,与测量次数  $n$  有关,  $n$  取 1 时  $k_n$  取 1.25。

当传感器精度下降时,其标准不确定度会随着发生改变,神经网络在时间序列预测领域被广泛应用,是一种较为有效的预测方法。由于标准不确定度对传感器输出变化十分敏感,故可通过理论标准不确定度与实际标准不确定的残差是否超过一定阈值判断是否发生了精度下降故障。

3 实验验证

本文实际调研了某钢管厂 F400 方矩管生产线,工艺流程如图 7、8 所示。图 7 为生产线整体结构,主要由 12 台轧机和 1 台高频焊机组成;图 8 为生产线采用的直接成方工艺流程,其中数字 1~12 代表钢带经 12 台轧机逐渐弯曲成型,数字 13 代表最终由高频焊机焊接。

首先,以几种常用规格矩形钢管的生产为例,对比



图 7 整机生产线  
Fig. 7 Machine production line

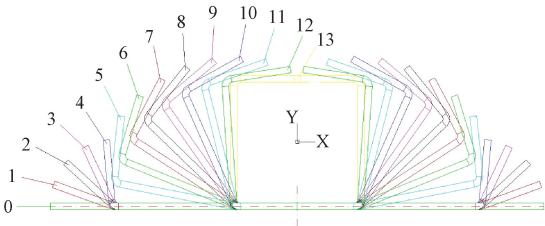


图 8 生产线工艺流程  
Fig. 8 Production line process

应用轧辊位置自动调整系统前后的误差变化<sup>[20]</sup>,说明改造的合理性。轧辊位置调整精度对比如表 4 所示,成品合格率对比如表 5 所示。

表 4 轧辊位置调整精度对照表

| Table 4 Roll position adjustment accuracy comparison table |           |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| 产品规格                                                       | 原系统调整最大误差 | 改造后调整最大误差 |
| 200×300×4.5                                                | ±8        | ±1        |
| 300×300×4.5                                                | ±6        | ±1        |
| 400×400×4.5                                                | ±8        | ±1        |

表 5 成品合格率对照表

| Table 5 Comparison of finished product yield rate |          |          |
|---------------------------------------------------|----------|----------|
| 产品规格/mm                                           | 原系统合格率/% | 改造后合格率/% |
| 200×300×4.5                                       | 85       | 93       |
| 300×300×4.5                                       | 86       | 91       |
| 400×400×4.5                                       | 82       | 94       |

结果表明,改造后的系统调整最大误差在±1 mm 以内,原先调整方式最大误差为±8 mm,精度提高了约 85%;成品的合格率平均可达 92%,较原系统 84%的平均合格率提高了 8%。可见,该系统较大提升了调整精度和成品合格率,为企业生产提高效率,节约成本。

图 9(a)、(b)所示为小波去噪前后结果,测试数据为随机选择的某一个磁栅尺在轧辊位置调整时所记录的部分数据。

经小波去噪后的值中,选取最后 100 个样本点作为测试集,其余样本点作为训练集,输入到自适应线性神经网络中,设置网络的延迟链为 10。使用 MATLAB 训练自适应线性神经网络,只需 10 次迭代即可到达稳定状态,

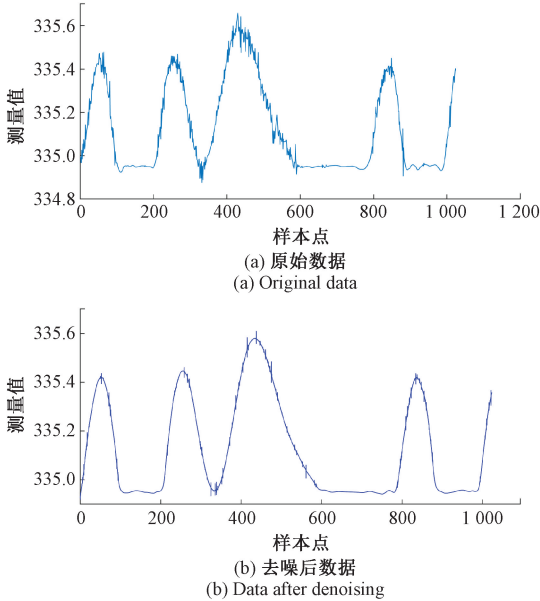


图 9 测试数据去噪前后对比  
Fig. 9 Comparison of test data before and after denoising

如图 10 所示,并且在第 4 次迭代后误差就可以减少至 0.001 403 6,该网络训练速度很快,满足工业现场实时性的要求。

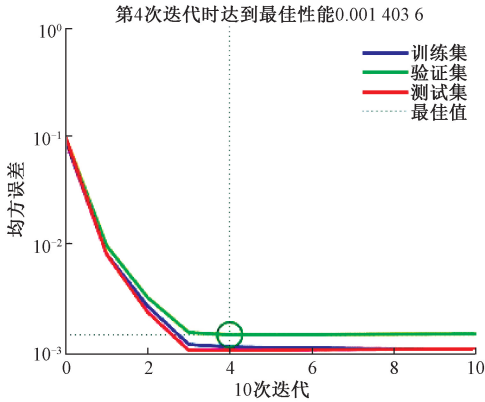


图 10 自适应线性网络收敛曲线  
Fig. 10 Convergence curve of adaptive linear network

同样选取最后 100 个样本点,利用式(3)评估传感器的标准不确定度,评估结果如图 11 所示。选用的磁栅尺实际标准不确定度为 0.02 mm,实际测得单次不确定度变化较大,分散性较强,通过将整个测试周期内的标注不确定度做均值化处理,得到的标准不确定度值为 0.021 1 mm,与实际值十分接近。

依照上述方法,计算生产线上所有磁栅尺的标准不确定度,为了避免单次测量的随机性,重复进行 5 次实验,实验结果中正常传感器的平均不确定度中有 95%在  $2.5 \times 10^{-5}$  以下,故选取  $2.5 \times 10^{-5}$  作为阈值。

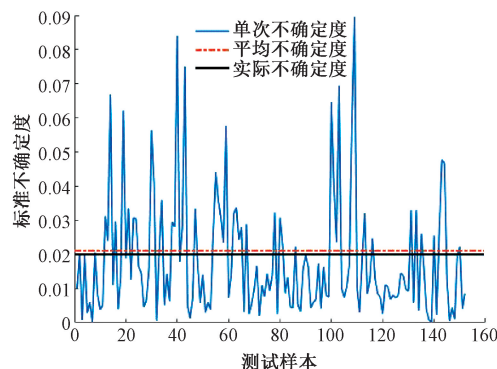


图 11 传感器不确定度评估结果

Fig. 11 Sensor uncertainty assessment results

选取 200 组数据进行测试,其中前为 100 组正常数据,后 100 组为异常数据,模拟发生精度下降故障。测试结果如图 12 所示。

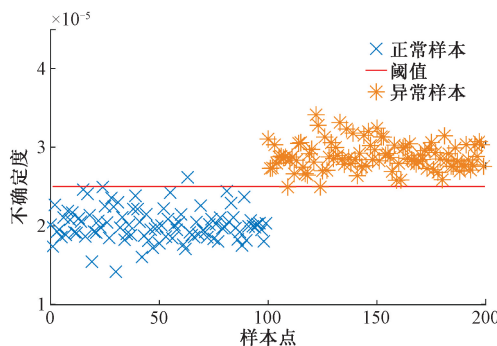


图 12 故障检测结果

Fig. 12 Fault detection results

由图 12 可以看出,通过不确定度检测传感器故障的方法,准确地很高,可达 90% 以上,误报率为漏报率都很低。

## 4 结 论

本文研究设计了冷弯空心型钢机组轧辊位置自动调整系统,采用磁栅尺和编码器作为测距传感器构成闭环控制,提高位置调整精度。利用小波滤波和神经网络,通过预测传感器输出时间序列,计算标准不确定度以检测传感器故障并评估传感器性能,保障生产安全。实际运行结果表明,本文设计系统满足了工业生产需求,提高了企业生产效率。

## 参考文献

[ 1 ] 朱剑明,吕晟. 方矩管直接成方原理及成型工艺[J]. 焊管, 2011, 34(7): 38-43.  
ZHU J M, LV SH. Working principle and forming process for directly forming to square of rectangular

pipe [J]. Welded Pipe and Tube, 2011, 34 ( 7 ): 38-43.  
[ 2 ] GE S, ISAC M, GUTHRIE R I L. Progress in strip casting technologies for steel; technical developments[J]. IsIJ International, 2012, 52 ( 12 ): 2109-2122.  
[ 3 ] 全江涛. “直接成方”矩形管生产工艺及设备的研究[J]. 焊管, 2017, 40(8): 53-57.  
TONG J T. Research on the production process and equipment of “direct square” rectangular pipe [J]. Welded Pipe and Tube, 2017, 40(8): 53-57.  
[ 4 ] 黄玉龙. 高强钢方矩管辊压成形工艺[J]. 锻压技术, 2018, 43(8): 117-121.  
HUANG Y L. Rolling process of high strength steel rectangular tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43 ( 8 ): 117-121.  
[ 5 ] GAO Q, LIU W J, LI D, et al. Research and implementation of the roll position automatic adjustment system based on roller parameters prediction[J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2019, 18(2): 273-292.  
[ 6 ] 牛刚,曹雪杰,秦肖肖. 高速列车双通道速度传感器故障检测与隔离研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 158-165.  
NIU G, CAO X J, QIN X X. Research on fault detection and isolation of dual channel speed sensor for high-speed train [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 158-165.  
[ 7 ] 孙铮,肖本贤. 线控转向电动叉车控制系统多故障检测和隔离[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 108-116.  
SUN ZH, XIAO B X. Electric steering-by-wire forklift control system multiple faults detection and isolation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 108-116.  
[ 8 ] 戴聪,刘勇智,李杰. 开关磁阻电机位置传感器机械偏移故障诊断和容错控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(9): 12-19.  
DAI C, LIU Y ZH, LI J. Mechanical deviation fault diagnosis and tolerant control on position sensor in switched reluctance motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32 ( 9 ): 12-19.  
[ 9 ] 韩军,周慧君,常瑞丽. 数控机床伺服进给系统无传感器性能评估技术的研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(13): 180-182,161.  
HAN J, ZHOU H J, CHANG R L. Research on sensor-less performance evaluation technology for number control



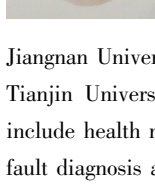
- machine tool servo driving system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(13): 180-182, 161.
- [10] 王路瑶, 吴斌, 杜志敏, 等. 基于长短期记忆神经网络的数据中心空调系统传感器故障诊断[J]. 化工学报, 2018, 69(S2): 252-259.
- WANG L Y, WU B, DU ZH M, et al. Sensor fault detection and diagnosis for data center air conditioning system based on LSTM neural network [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2018, 69(S2): 252-259.
- [11] 夏金辉, 郭源博, 张晓华. 单相脉宽调制整流器传感器故障诊断与容错控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 160-170.
- XIA J H, GUO Y B, ZHANG X H. Sensor fault diagnosis and fault tolerant control for single-phase PWM rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 160-170.
- [12] 张珂, 宋文丽, 石怀涛, 等. 基于改进核主元分析的故障检测方法研究[J]. 控制工程, 2017, 24(2): 418-424.
- ZHANG K, SONG W L, SHI H T, et al. Fault detection based on improved kernel principal component analysis [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(2): 418-424.
- [13] WU Y T, YUAN M, DONG S P, et al. Remaining useful life estimation of engineered systems using vanilla LSTM neural networks [J]. Neurocomputing, 2018, 275: 167-179.
- [14] 周恩会. SONY 磁栅传感器在钢板轧机辊缝控制中的应用[J]. 冶金设备, 2016(3): 63-66.
- ZHOU EN H. Application of SONY magnetic grid sensor in the AGC control of plate mill rolling [J]. Metallurgical Equipment, 2016(3): 63-66.
- [15] BOUROGAOUI M, SETHOM H B A, BELKHODJA I S. Speed/position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives: A review [J]. ISA Transactions, 2016, 64: 269-284.
- [16] 闫秀芳, 王志国, 高晓辉. PLC 基于 Modbus 通讯的控制系统研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(2): 127-130.
- YAN X F, WANG ZH G, GAO X H. Research on control system based on Modbus communication of PLC [J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(2): 127-130.
- [17] 刘长青. S7-1500 PLC 项目设计与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 1-434.
- LIU CH Q. Design and Practice of S7-1500 PLC Project [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016: 1-434.
- [18] CHEN J L, LI Z P, PAN J, et al. Wavelet transform based on inner product in fault diagnosis of rotating machinery: A review [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016(70-71): 1-35.
- [19] 黄杏往, 王胜勇, 卢家斌, 等. 基于自适应线性神经网络的轧辊偏心控制方法[C]. 第九届中国钢铁年会, 2013: 1-8.
- HUANG X W, WANG SH Y, LU J B, et al. Roll eccentricity control method based on the adaptive linear neural network [C]. 9th China Steel Conference, 2013: 1-8.
- [20] GAO Q, LIU W J, LI D, et al. Research and implementation of the roll position automatic adjustment system on the one-time forming of cold-formed steel unit[J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2018, 17(2): 231-248.

## 作者简介



**田宇**, 2017 年于江南大学获得学士学位, 现为天津理工大学硕士研究生, 主要研究方向为工业过程控制系统的健康管理、故障诊断与预测。

E-mail: 2634769267@qq.com



**Tian Yu** received his B. Sc. degree from Jiangnan University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University of Technology. His main research interests include health management of industrial process control systems, fault diagnosis and prediction.



**高强**, 1990 年于天津理工大学获得学士学位, 1996 年于天津大学获得硕士学位, 现为天津理工大学教授, 主要研究方向为智能控制、复杂非线性系统控制和故障诊断与预测。

E-mail: gaoqiang@tjut.edu.cn

**Gao Qiang** received his B. Sc. degree from Tianjin University of Technology in 1990, M. Sc. degree from Tianjin University in 1996. Now he is a professor at Tianjin University of Technology. His main research interests include intelligent control, process complex nonlinear system control and fault diagnosis and prediction.