

# 振动自感知刀具磨损无线监测

郭宏，胡孔耀，闫献国，伊亚聪，徐延  
(太原科技大学机械工程学院，030024，太原)

**摘要：**Zigbee 无线技术监测切削刀具磨损的振动传感器系统，存在通信距离近、组网复杂等问题，故提出一种基于 WiFi 无线传感器网络采集振动信号的刀具磨损状态监测方法。首先，组建以 ESP8266 WiFi 开发板为核心、高精度振动传感器 ADXL345 为敏感元件的无线采集振动信号网络；然后，根据刀具整体形状，将振动传感器粘贴在刀具表面，并使用自感知刀具进行 45 钢棒料外圆切削实验无线采集振动信号，同时在相同的切削条件下采集振动信号与有线方式进行对比，验证该装置可行性；最后，将时域信号中部分统计量作为特征向量导入至支持向量机回归模型中进行训练，并获得刀具磨损预测模型。实验结果表明，自感知刀具无线采集信号的相对误差在 3.61% 以内，具有较好的可行性；支持向量机回归刀具磨损预测模型的分辨准确率达到 94.38%，证明所设计的无线系统可以准确地监测刀具磨损。

**关键词：**无线传感器网络；刀具磨损状态监测；振动信号；支持向量机回归

**中图分类号：**TH164   **文献标志码：**A

**DOI：**10.7652/xjtuxb202211001   **文章编号：**0253-987X(2022)11-0001-10

## Wireless Monitoring of Wear of the Vibration Self-Sensing Tool

GUO Hong, HU Kongyao, YAN Xianguo, YI Yacong, XU Yan  
(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The vibration sensor system based on Zigbee wireless technology has the problems of short communication distance and complex networking when used for monitoring cutting tool wear. Therefore, this paper proposes a tool wear monitoring method based on WiFi wireless sensor network to collect vibration signals. Firstly, a wireless vibration signal acquisition network with ESP8266 WiFi development board at its core and the high-precision vibration sensor ADXL345 as the sensitive element is established. Then according to the overall shape of the tool, the vibration sensor is pasted on the tool surface to make a self-sensing tool for collecting wireless vibration signals during the outer circle cutting experiment of 45 steel bar. At the same time, hard-wired vibration signals are collected under the same cutting conditions for comparison with wireless ones to verify the feasibility of the device. Finally, some statistics of the time domain signals are imported into the support vector machine regression model as feature vectors for training, and the tool wear prediction model is obtained. The experimental results show that the relative error of the wireless signals collected by the self-sensing tool is smaller than 3.61%, which means the method proposed is feasible; the resolution accuracy of the tool wear prediction model based on support vector machine regression is 94.38%, which proves that the designed

wireless system can accurately monitor tool wear.

**Keywords:** wireless sensor network; tool wear monitoring; vibration signal; support vector machine regression

在新型制造业环境下,需要对机床、刀具进行状态监测,保证在切削加工过程中能够良好地运行,提高加工效率<sup>[1]</sup>。切削加工(车、铣、钻等)是制造业的一种最重要的加工模式,刀具作为切削加工的“牙齿”,作用是无可替代的。根据刀具加工时监测数据预测刀具使用状况,并由此实施精准的维护,对于保障刀具的运行可靠性具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。刀具磨损监测主要分为直接法和间接法<sup>[4-5]</sup>。间接法是通过监测切削力、振动、声发射等与刀具磨损密切相关的传感器信号,并建立刀具磨损值和信号特征之间的数学模型,间接获得刀具磨损状态。振动信号在判断机械故障以及获取机械的工作状态中发挥着重要作用<sup>[6-7]</sup>,在实际切削加工中,由于传感器安装位置、测试精度和技术水平等条件的限制,相较于加速度测量,位移和速度的测量更加困难,因此利用加速度传感器实现振动信号的测量更具有可操作性。

随着无线传感器网络<sup>[8-9]</sup>(wireless sensor networks,简称 WSNs)技术的发展,现以 Zigbee 技术<sup>[10-11]</sup>为代表的数据无线传输技术在刀具磨损状态监测领域得到广泛应用。国外方面,Lei 等<sup>[12]</sup>使用 STM32 作为控制中心,以 Si4463 为无线射频收发核心,配备微机电系统(micro electro-mechanical system,简称 MEMS)加速度传感器作为信号采集前端,实现振动信号的高频、高精度采集。Hossain 等<sup>[13]</sup>研制了以 Cortex M4 处理器为处理单元,使用 Zigbee 收发器无线传输振动数据,并进行了接收信号强度的性能使用分析。Wang 等<sup>[14]</sup>使用一种 MEMS 六轴电容式加速度传感器 MPU6050 和 Zigbee 节点监测大型户外广告牌的结构健康。国内方面,薛晨阳等<sup>[15]</sup>结合压电、电磁和摩擦电 3 种发电方式,组成复合的能量采集模块来采集煤机装备的振动能量,结合无线传输电路及后端信号处理,实现装备状态监测。汤明等<sup>[16]</sup>设计了一种将 MEMS 振动传感元件和 Zigbee 无线通信技术结合起来的振动传感器,为无线传感方案提供了新思路。刘冬明等<sup>[17]</sup>利用三轴加速度传感器数据采集模块、MSP430 数据处理模块与 CC2530 无线通信模块完成机械设备高频振动监测的要求。上述方法都是采用 Zigbee 技术进行振动信号无线传输,但是该技术使用模块较多、组网复杂。

因此,本文采用一种基于 WiFi 技术的振动信号传输系统,使用体积小、重量轻和精度高的 MEMS 振动传感器采集振动数据。通过实验验证该监测系统的有效性,并提取振动信号特征与刀具磨损值放到支持向量机回归模型中进行预测,实现对切削加工刀具的磨损状态监测。

## 1 无线监测系统总体设计

### 1.1 无线监测系统

刀具磨损状态无线监测系统主要目标是显示采集回来的振动的实时数据,达到智能、远距离监测的目标。将振动传感器粘贴在刀具侧面并与数据无线传输模块相连,使用锂电池给模块供电。振动数据经无线传输模块传输至计算机,然后计算机将无线传输的数据保存到本地表格。整体无线监测系统如图 1 所示。此外通过分析刀具磨损和振动信号特征之间的统计规律,建立刀具磨损值和振动信号特征之间的函数关系,实现刀具磨损量的精准预测,及时对切削加工方案进行调整,延长刀具使用寿命,减小损失。无线监测系统数据传输如图 2 所示。

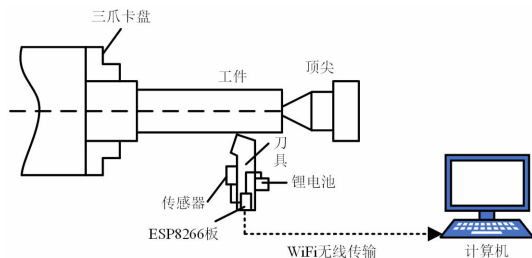


图 1 无线监测系统

Fig. 1 Wireless monitoring system diagram

### 1.2 无线监测系统硬件模块

#### 1.2.1 振动传感器模块

振动传感器模块设计采用 ADI 公司推出的高性能三轴 MEMS 加速度传感器 ADXL345<sup>[18]</sup>。ADXL345 能够采集  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴方向加速度信号,灵敏度为  $3.9 \text{ mV/g}$ ,分辨率为 13 位,量程为  $\pm 16g$ ,供电电压为  $3.3 \text{ V}$ ,通过串行外围接口(SPI)或集成电路(I<sup>2</sup>C)数字接口访问。具有低功耗、低噪声、高灵敏度等特点,同时具有内部低通滤波电路,可实现低通信号滤波。图 3 给出了加速度传感器引脚说明。

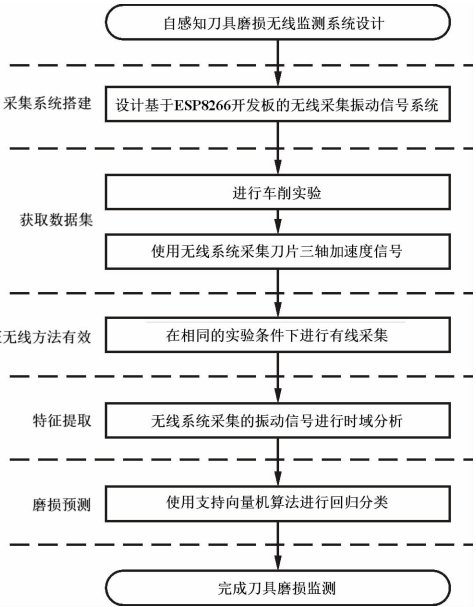


图 2 无线监测系统数据传输

Fig. 2 Wireless monitoring system data transmission diagram

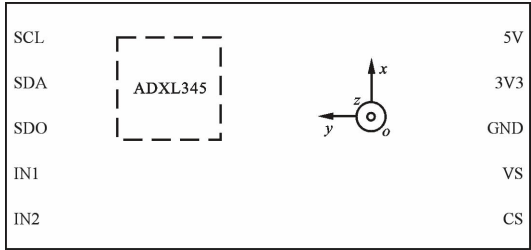


图 3 加速度传感器引脚说明

Fig. 3 Accelerometer pin description diagram

1. 2. 2 ESP8266 WiFi 模块

微控制器节点采用的是乐鑫公司开发的一款 ESP8266 模块<sup>[19]</sup>,该模块集 WiFi、通用输入输出、脉冲宽度调制、I<sup>2</sup>C 和模拟数字转换器于一体。有 10 个通用输入输出,都可以进行脉冲宽度调制。采用串口与单片机通信,内置 TCP/IP 协议栈,可以实现串口与无线 WiFi 之间的转换。使用 ESP8266 模块,其他的串口设备只是通过简单的串口配置,也就是只需要通过无线 WiFi 传输自己的内部数据。ESP8266 作为一款 WiFi 网络通信模块,具有运行稳定、功耗低、价格便宜等特点,该模块不仅能够独立运行,也可作为子模块搭载于其他控制器运行。ESP8266 模块的引脚说明图如图 4 所示。

1. 2. 3 Arduino 模块

有线采集振动信号设计选用 Arduino 作为开发板。Arduino 是基于微控制器 ATmega328P 的开发板,支持在线串行编程,使得开发应用变得方便而快捷。将前端振动传感器采集到的加速度信号经过

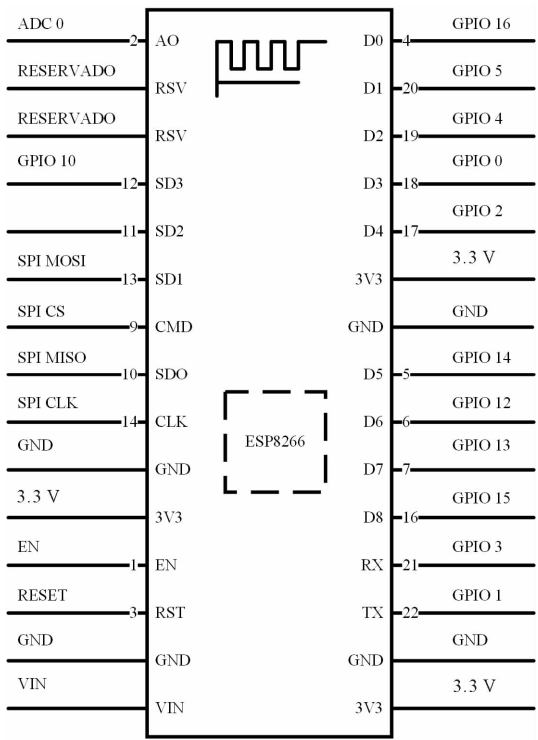


图 4 ESP8266 引脚说明图

Fig. 4 ESP8266 pinout diagram

ADC 输入通道传输至 Arduino 开发板,再由开发板通过 USB 接口与计算机连接通信,将数据传至计算机后开始处理。表 1 为 Arduino 开发板的技术参数,其微控制器型号是 ATmega328P。

表 1 Arduino 开发板的技术参数

Table 1 Arduino board technical parameters

| 参数           | 数值 |
|--------------|----|
| 工作电压/V       | 5  |
| 数字 I/O 引脚数   | 14 |
| PWM 引脚数      | 6  |
| 模拟输入通道(ADC)数 | 6  |
| 时钟频率/MHz     | 16 |
| 质量/g         | 25 |

1. 3 无线监测系统软件模块

1. 3. 1 无线采集板开发环境

ESP8266 开发板用的编程软件是 Arduino IDE。Arduino IDE 相当于 ESP8266 产品的大脑,是代码的编译环境。该软件的界面有 4 个部分,分别是菜单栏、工具栏、编辑区和状态区。主要工作流程是在工具栏里选择开发板类型及端口号,在编辑区编译代码保证正确后上传至 ESP8266 开发板,开发板接收到命令后,就会输出一个信号,该信号可以

在软件的串口监视器中查看,即模拟了信号采集的效果。

### 1.3.2 无线采集板程序设计

软件部分主要实现振动信号的采集和无线传输。采集设备通过 USB 数据线连上计算机后,在 Arduino IDE 软件上选择 ESP8266 开发板和相对应的端口,然后开始上传无线采集振动信号程序,上传完成后各模块进行初始化,等待 ESP8266 开发板连接上本地 WiFi。连接成功后,打开串口监视器,会提供一个 IP 网址。断开 USB 数据线,使用锂电池对 ESP8266 开发板供电,并在计算机端打开提供的网址,观察信号变化。在程序循环里,设备进行振动信号采集、发送过程,直到接收到上位机的停止命令为止。无线采集振动信号的程序流程如图 5 所示。

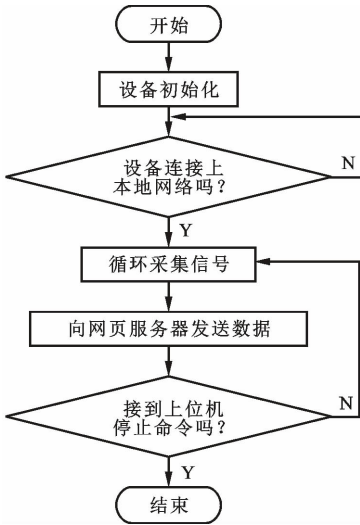


图 5 无线方式信号采集程序流程图

Fig. 5 Wireless signal acquisition program flow chart

## 2 切削实验与结果分析

### 2.1 切削实验

#### 2.1.1 实验机床与刀具

实验以荆州荷花机床有限公司的 CK6136B 数控车床为加工平台,其主电机功率为 4 kW,主轴转速范围为 100 r/min~2 500 r/min,最大车削长度为 450 mm,允许的最大回转直径为 360 mm。

实验选用机夹式车刀,刀片材料是硬质合金 YT15,具体自感知刀具如图 6 所示。图 6 还给出了传感器摆放位置,加工时 y 轴垂直向下,是主振方向,振动传感器粘贴在刀体表面。

#### 2.1.2 实验材料与方法

本实验以车削圆柱棒料外圆为例,工件及加工方式如表 2 所示。考虑到切削过程中三要素(切削

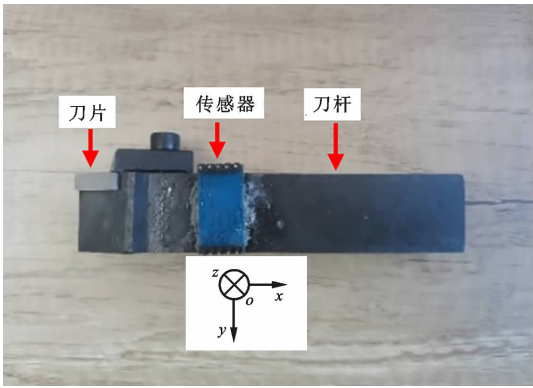


图 6 自感知刀具

Fig. 6 Self sensing tool

速度、进给量、切削深度)对振动的影响,设计了三因素三水平  $L_9(3^3)$  的正交实验,即正交实验共进行 9 组切削,每组再分成 6 段切削,每段切削长度为 40 mm,总共切削长度为 240 mm,具体的实验参数如表 3 所示。

表 2 工件及加工方式

Table 2 Workpiece and processing method

| 工件材料 | 工件长度/<br>mm | 工件直径/<br>mm | 切削方式 | 有无<br>切削液 |
|------|-------------|-------------|------|-----------|
|      |             |             |      |           |
| 45 钢 | 400         | 30          | 外圆车削 | 无         |

表 3 实验切削条件和分组设计

Table 3 Experimental cutting conditions and grouping design

| 实验组号 | 因素 1<br>切削速度/<br>( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 因素 2<br>切削深度/<br>mm | 因素 3<br>进给量/<br>( $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ ) |
|------|-------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|
|      |                                                       |                     |                                                     |
| 1    | 29.2                                                  | 0.2                 | 0.1                                                 |
| 2    | 29.2                                                  | 0.4                 | 0.2                                                 |
| 3    | 29.2                                                  | 0.6                 | 0.3                                                 |
| 4    | 33.0                                                  | 0.2                 | 0.2                                                 |
| 5    | 33.0                                                  | 0.4                 | 0.3                                                 |
| 6    | 33.0                                                  | 0.6                 | 0.1                                                 |
| 7    | 39.6                                                  | 0.2                 | 0.3                                                 |
| 8    | 39.6                                                  | 0.4                 | 0.1                                                 |
| 9    | 39.6                                                  | 0.6                 | 0.2                                                 |

按照前面的实验条件和实验参数,做了 9 组无线方式采集实验,采用杜邦线将振动传感器、ESP8266 板和锂电池依次连接,并将后两者固定在刀架上,无线采集装置如图 7 所示。为了验证所提出的无线振动信号采集方法的有效性,对比使用一种常用的 Arduino 开发板与振动传感器连接的有线



方式<sup>[20]</sup>,在相同的 9 组实验参数条件下进行振动数据采集,有线采集装置图如图 8 所示。

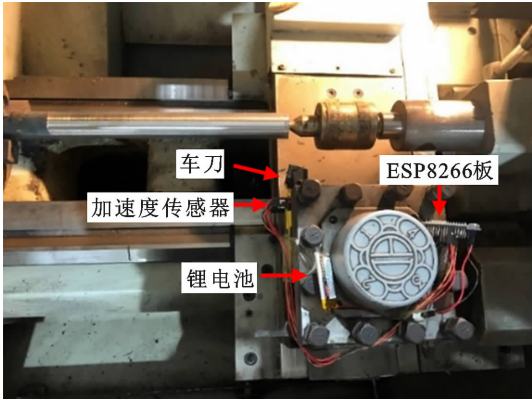


图 7 无线采集装置

Fig. 7 Wireless acquisition device diagram

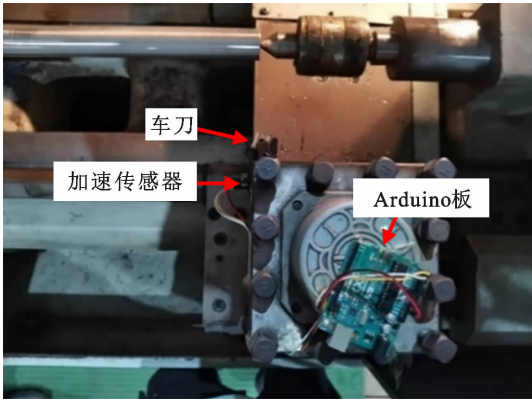
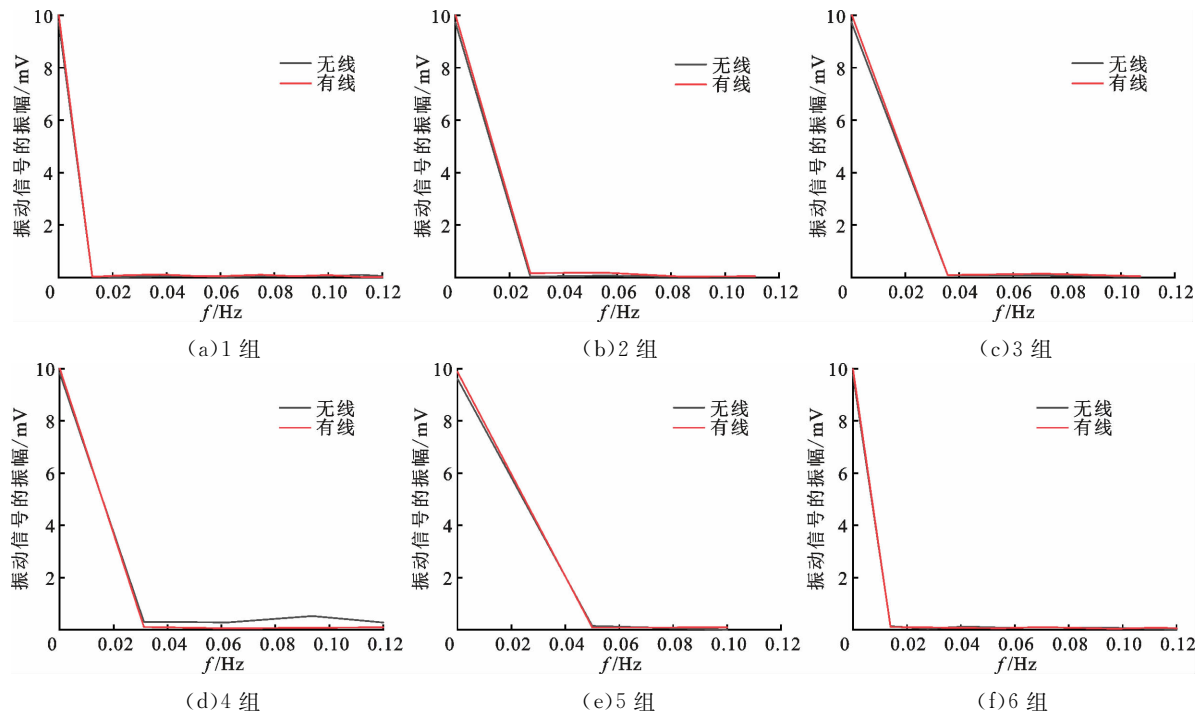


图 8 有线采集装置

Fig. 8 Wired acquisition device diagram



2.2 实验结果分析

2.2.1 振动信号采集准确性验证

经每组数据对比发现,从第 3 段数据开始刀具进入平稳切削状态,因此先提取无线方式采集和有线方式采集的每组第 3 段 y 轴振动时域信号的特征均值,进行相对误差比较,结果如表 4 所示。可以得出结论,最大误差为 3.61%,小于通用误差 5%。

表 4 无线和有线数据特征均值的相对误差  
Table 4 Relative error value of the feature mean for wireless and wired data

| 实验组号 | 无线 y 轴<br>特征均值 | 有线 y 轴<br>特征均值 | 相对误差/<br>% |
|------|----------------|----------------|------------|
| 1    | 9.761 4        | 10.048 5       | 2.86       |
| 2    | 9.729 1        | 10.020 0       | 2.90       |
| 3    | 9.740 6        | 10.064 3       | 3.22       |
| 4    | 9.832 1        | 10.016 3       | 1.84       |
| 5    | 9.608 5        | 9.878 0        | 2.73       |
| 6    | 9.761 0        | 9.971 1        | 2.11       |
| 7    | 9.816 2        | 9.961 7        | 1.46       |
| 8    | 9.789 1        | 9.966 3        | 1.78       |
| 9    | 9.733 4        | 10.097 5       | 3.61       |

对该时域信号再做相应的频域分析,9 组无线、有线采集振动信号对比如图 9 所示。由图 9 可以看出,黑色实线是无线方式采集,红色虚线是有线方式采集,两根曲线相似程度较高。因此无线传输方法与有线方法都能采集准确的信号,并且无线方法比有线方法更便捷。证明所提出的无线采集振动信号

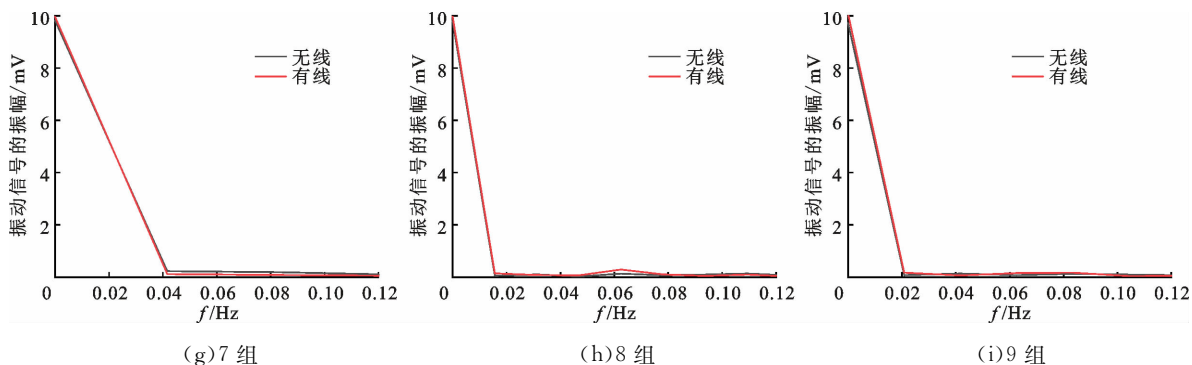


图9 无线、有线采集振动频域信号对比

Fig. 9 Comparison of vibration frequency domain signals collected by wireless and wired

方法是有效的。

### 2.2.2 振动信号分析及特征提取

把无线方式采集的每组共6段数据3个轴的加速度信号放在一起,经过时域分析得到无线采集振动信号时域图,如图10所示。由无线采集系统得到

的9组振动数据时域图可以看出,黑线  $x$  轴在  $1 \text{ m/s}^2$  附近波动、红线  $y$  轴在  $-9.8 \text{ m/s}^2$  附近波动、蓝线  $z$  轴在  $0 \text{ m/s}^2$  附近波动,数据结果非常符合无线采集系统实际工作情况。

从传感器获取的信号不能直接识别刀具磨损状

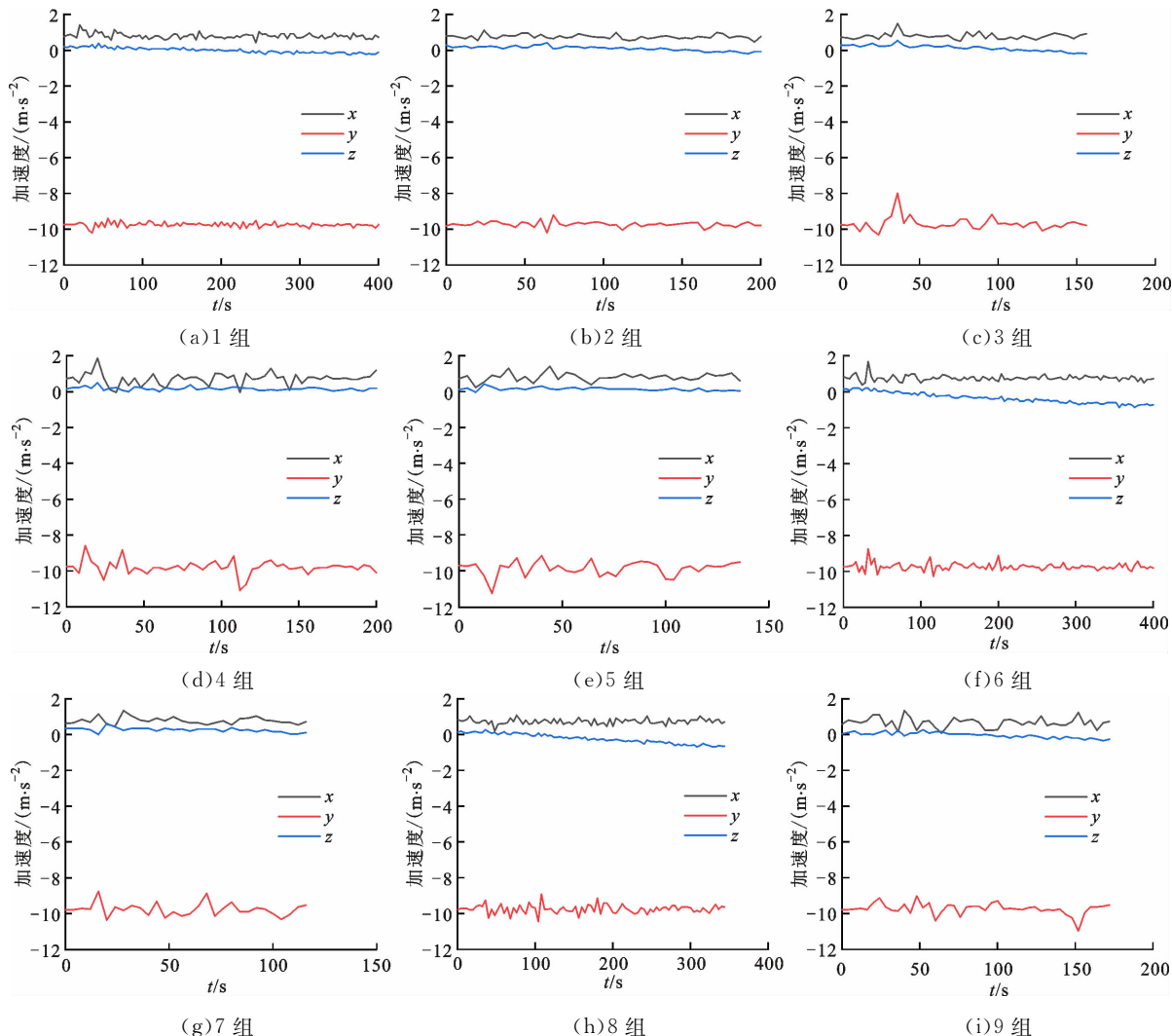


图10 无线采集振动信号时域图

Fig. 10 Wireless acquisition of vibration signal time domain diagram

态,必须对这些信号进行时域分析,提取反映刀具磨损的信号特征<sup>[21-22]</sup>。选取图 10 里时域信号  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个轴的均方根值、波形指标、峭度指标和裕度指标作为特征值。

### 3 刀具磨损预测

#### 3.1 切削刀具磨损值测量

本文刀片磨损值测量使用的是陕西威尔机电科技有限公司生产的轮廓仪 SP 系列,该轮廓仪具有高分辨率数字式轮廓传感器,测量精度可达  $0.6\text{ }\mu\text{m}$ 。

轮廓仪刀具磨损微观形貌图如图 11 所示,是多次测量后比较测量图形,取接近于平均值的一次测量结果绘制。表 5 是无线采集系统 9 组对应的刀具磨损值,每个磨损值都是经过多次测量取平均值。可以看出,本次实验刀具磨损值是比较小的。

表 5 正交实验无线方式刀具磨损值

Table 5 Orthogonal experiment wireless method tool wear value

| 实验组号 | 切削速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | 切削深度/<br>mm | 进给量/<br>( $\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$ ) | 后刀面磨损值/mm |
|------|---------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|-----------|
| 1    | 29.2                                        | 0.2         | 0.1                                       | 0.021     |
| 2    | 29.2                                        | 0.4         | 0.2                                       | 0.026     |
| 3    | 29.2                                        | 0.6         | 0.3                                       | 0.021     |
| 4    | 33.0                                        | 0.2         | 0.2                                       | 0.024     |
| 5    | 33.0                                        | 0.4         | 0.3                                       | 0.022     |
| 6    | 33.0                                        | 0.6         | 0.1                                       | 0.045     |
| 7    | 39.6                                        | 0.2         | 0.3                                       | 0.046     |
| 8    | 39.6                                        | 0.4         | 0.1                                       | 0.056     |
| 9    | 39.6                                        | 0.6         | 0.2                                       | 0.072     |

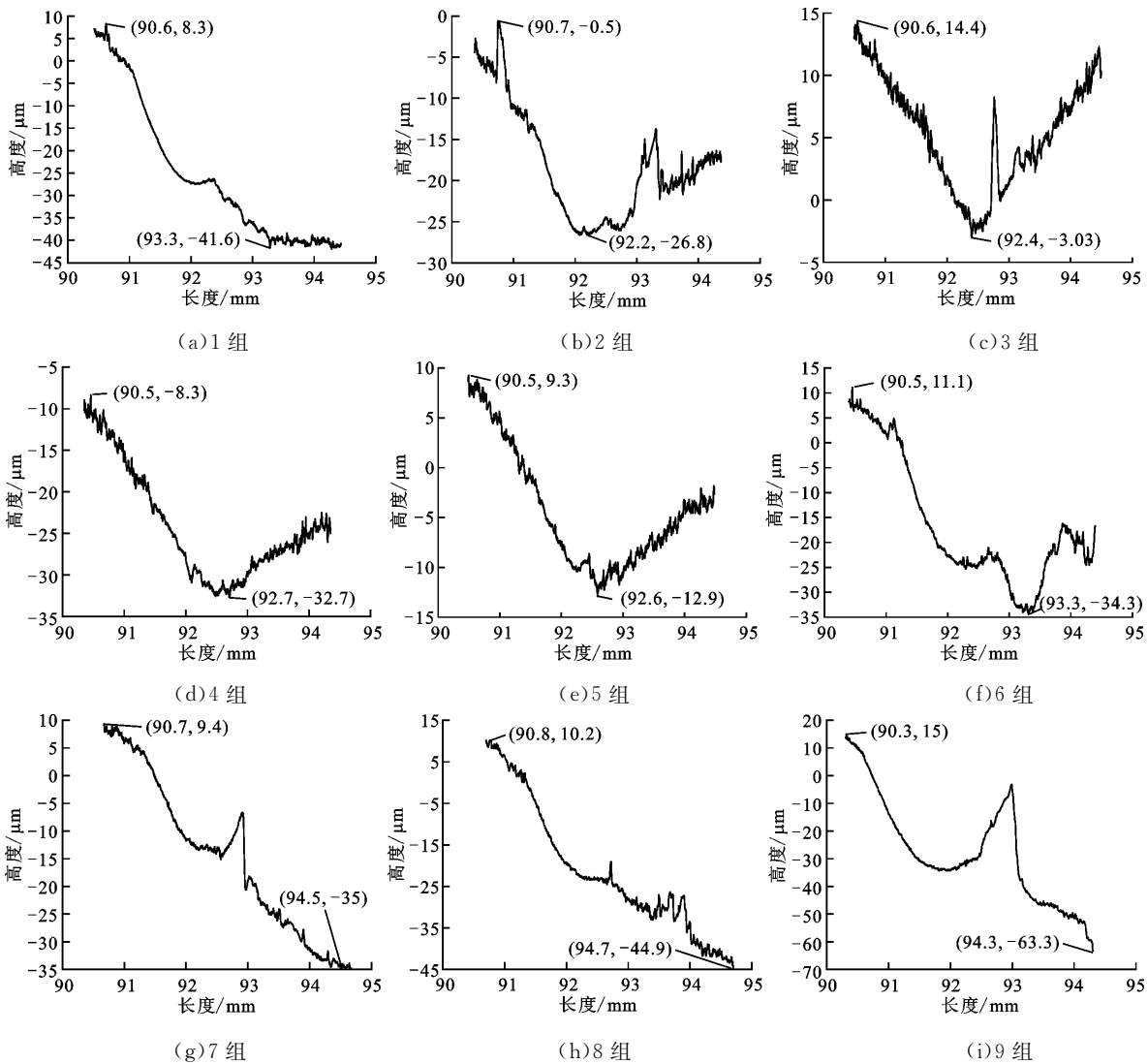


图 11 轮廓仪刀具磨损微观形貌图

Fig. 11 Micro topography of tool wear of profiler

### 3.2 支持向量机回归预测刀具磨损值

支持向量机回归<sup>[23-24]</sup> (support vector regression, 简称 SVR), 在小样本中具有很好的泛化能力<sup>[25]</sup>。设样本数据为 $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $x_i$  为输入量,  $y_i$  为期望值。设需要求解的回归函数为

$$f(x) = wx + b \quad (1)$$

式中:  $w$  为系数向量, 用于定义回归函数在空间中的位置;  $b$  为常数。

为了使得拟合函数更理想, 需设置拟合精度  $\epsilon$ , 再引入松弛变量  $\xi, \xi^*$ 。由此式(1)转换为

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s. t.} \begin{cases} y_i - wx_i - b \leq \epsilon + \xi_i \\ wx_i + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $C$  为惩罚因子, 表示对超出误差范围的样本的惩罚程度。

接着引入拉格朗日函数  $W(\alpha, \alpha^*)$ , 并最大化, 求得最终回归函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (x_i x) + b \quad (3)$$

利用 SVR 算法构建刀具磨损值预测模型。按 2:1 的比例将实验所得的全部 9 组数据随机分为训练集 6 组和测试集 3 组。选取 2.2.2 小节的 4 个特征值作为输入样本, 以预测磨损值作为输出。采用 SVR 算法建立刀具磨损值预测模型, 进行刀具磨损值的拟合预测, 其建模流程如图 12 所示。

经 SVR 多次预测后, 其中一次准确率为 96.39%, 测试集测试结果如图 13 所示。因为特征向量的训练集和测试集都是随机产生的, 为了避免一次测试的偶然性, 使用十折交叉验证法, 进行 10 次十折交叉验证, 计算得出 10 次 SVR 回归结果的准确率如表 6 所示。10 次十折交叉验证的准确率最大值是 97.76%, 最小值是 90.14%, 均值是 94.38%, 因此支持向量机回归具有较高的精度, 可以使用该方案进行刀具磨损预测。

## 4 结 论

本文设计了一种集成振动传感器的自感知刀具磨损无线监测系统, 该系统优化了有线方式采集振动信号并监测刀具磨损的方法, 是利用 WiFi 网络技术, 通过 ESP8266 开发板采集振动信号并将数据无线上传至计算机, 在计算机上使用支持向量机回归模型对刀具磨损值进行拟合预测, 主要结论如下。

(1) 根据无线监测系统要求, 制作一种 WiFi 无

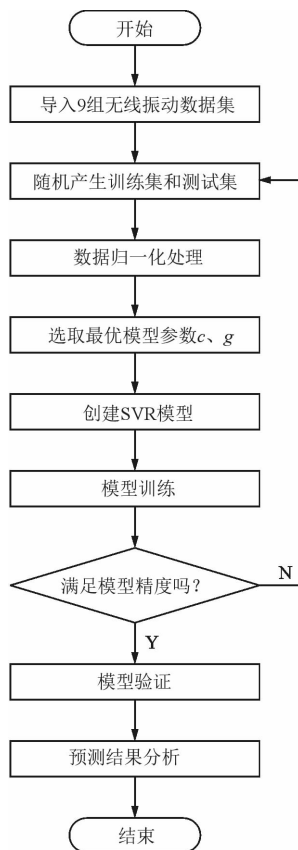


图 12 SVR 建模流程图

Fig. 12 SVR modeling flow chart

表 6 十折交叉验证结果

Table 6 Ten fold cross validation results

| 次数 | 准确率/% |
|----|-------|
| 1  | 92.68 |
| 2  | 95.61 |
| 3  | 92.81 |
| 4  | 90.14 |
| 5  | 94.63 |
| 6  | 96.39 |
| 7  | 95.62 |
| 8  | 97.76 |
| 9  | 94.08 |
| 10 | 94.07 |

线振动信号采集装置, 它包含振动传感器 ADXL 345、ESP8266 开发板和锂电池。该采集装置体积小、携带方便。

(2) 进行车削外圆实验, 验证设计的 WiFi 无线振动信号采集装置的可行性。由实验验证结果可知, 无线振动信号采集装置采集数据的特征均值误差率在 3.61% 以下, 因此该装置是可行且有效的。



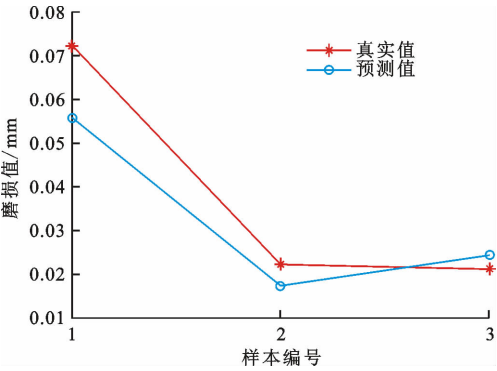


图 13 测试集测试结果

Fig. 13 Test set test results

(3)通过提取无线振动时域信号的特征向量和测量刀具后刀面磨损值,使用支持向量机回归模型进行刀具磨损值预测训练,由训练结果可知,识别准确率均值在 94.38%,可以实现刀具磨损值的预测。

由实验数据量可知,下一阶段将在扩展预测模型适应条件的基础上,开展相关实验验证研究。

参考文献:

[1] PANDA A, OLEJÁROVÁ Š, VALÍČEK J, et al. Monitoring of the condition of turning machine bearing housing through vibrations [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1): 401-411.

[2] 李天梅, 司小胜, 刘翔, 等. 大数据下数模联动的随机退化设备剩余寿命预测技术[J/OL]. 自动化学报 [2021-11-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=MOTO20210615000&DbName=CAPJ2021>.

LI Tianmei, SI Xiaosheng, LIU Xiang, et al. Data-model interactive remaining useful life prediction technologies for stochastic degrading devices with big data [J/OL]. Acta Automatica Sinica [2021-11-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=MOTO20210615000&DbName=CAPJ2021>.

[3] 刘献礼, 李雪冰, 丁明娜, 等. 面向智能制造的刀具全生命周期智能管控技术 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 196-219.

LIU Xianli, LI Xuebing, DING Mingna, et al. Intelligent management and control technology of cutting tool life-cycle for intelligent manufacturing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 196-219.

[4] ZAMUDIO-RAMÍREZ I, ANTONINO-DAVIU J A, TREJO-HERNANDEZ M, et al. Cutting tool wear monitoring in CNC machines based in spindle-motor

stray flux signals [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(5): 3267-3275.

[5] 聂鹏, 马尧, 张锴锋, 等. 刀具磨损监测技术研究现状与进展 [J]. 工具技术, 2021, 55(6): 3-12.

NIE Peng, MA Yao, ZHANG Kaifeng, et al. Research status and development of Tool wear monitoring technology [J]. Tool Engineering, 2021, 55(6): 3-12.

[6] 徐磊, 房立清, 李旭, 等. MEMS 加速度传感器的数据采集系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2019(9): 73-76, 95.

XU Lei, FANG Liqing, LI Xu, et al. Design of data acquisition system based on MEMS acceleration sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(9): 73-76, 95.

[7] 李霖, 张西宁, 刘书语, 等. 基于二维经验小波纹理域特征自适应提取的轴承故障诊断方法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(12): 79-86.

LI Lin, ZHANG Xining, LIU Shuyu, et al. Bearing fault diagnosis method based on 2D empirical wavelet transform texture domain feature adaptive extraction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(12): 79-86.

[8] SABATO A, NIEZRECKI C, FORTINO G. Wireless MEMS-based accelerometer sensor boards for structural vibration monitoring: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(2): 226-235.

[9] 肖鑫, 汤宝平, 邓蕾, 等. 机械振动无线传感器网络跨层同步采集累积误差控制方法 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 202-207.

XIAO Xin, TANG Baoping, DENG Lei, et al. Accumulated synchronous acquisition error control method based on cross-layer design for mechanical vibration wireless sensor networks [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(15): 202-207.

[10] TANIGAWA Y, NISHIKORI S, KINOSHITA K, et al. Joint Channel allocation and routing for ZigBee/WiFi coexistent networks [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2021, 104(5): 575-584.

[11] 肖静, 刘琦, 陈锐, 等. 基于 ZigBee 网络的盾构滚刀磨损在线监测系统的设计 [J]. 现代制造工程, 2021(5): 125-131.

XIAO Jing, LIU Qi, CHEN Rui, et al. Design of on-line monitoring system for disc-cutter wear of shield based on ZigBee network [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(5): 125-131.

[12] LEI Xinjun, WU Yunxin. Research on mechanical vibration monitoring based on wireless sensor network

- and sparse Bayes [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 2020(1): 225.
- [13] HOSSAIN N I, REZA S, ALI M. VibNet: application of wireless sensor network for vibration monitoring using ARM [C]// 2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 248-252.
- [14] WANG Haonan, DONG Linxi, WEI Wei, et al. The WSN monitoring system for large outdoor advertising boards based on ZigBee and MEMS sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3): 1314-1323.
- [15] 薛晨阳, 张浩凌, 崔娟, 等. 基于复合振动能量采集器的自供电无线传感微系统研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(8): 57-64.
- XUE Chenyang, ZHANG Haoling, CUI Juan, et al. Research on the self-powered wireless sensor micro-system based on the hybrid vibration energy harvester [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(8): 57-64.
- [16] 汤明, 郑婧, 黄文婷, 等. 基于 ZigBee 的无线振动传感器设计与实现 [J]. *传感技术学报*, 2018, 31(2): 312-318.
- TANG Ming, ZHENG Jing, HUANG Wenting, et al. Design and implementation of a ZigBee-based wireless vibration transducer for power transformer condition monitoring [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(2): 312-318.
- [17] 刘冬明, 武兵. 三轴高频采样的无线传感器网络节点设计 [J]. *机械设计与制造*, 2017(4): 166-168, 172.
- LIU Dongming, WU Bing. Design of wireless sensor network nodes for tri-axial high-speed sampling [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(4): 166-168, 172.
- [18] 张泽宇, 鲍爱达, 马游春, 等. 基于三轴数字加速度计的尾翼振动测试系统研究 [J]. *电子测量技术*, 2021, 44(2): 137-141.
- ZHANG Zeyu, BAO Aida, MA Youchun, et al. Research on tail wing vibration test based on three-axis digital accelerometer [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(2): 137-141.
- [19] 李少林, 张维路, 刘民, 等. 基于 ZigBee/WiFi 技术的无线数据采集与控制系统 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(9): 92-94, 98.
- LI Shaolin, ZHANG Weilu, LIU Min, et al. Wireless data acquisition and control system based on ZigBee and WiFi technology [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(9): 92-94, 98.
- [20] 陈吕洲. *Arduino 程序设计基础* [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014: 5-6.
- [21] 马海辉, 余小玲, 吕倩, 等. 一维卷积神经网络在往复式压缩机气阀故障诊断中的应用 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(4): 101-108.
- MA Haihui, YU Xiaoling, LÜ Qian, et al. Application of one-dimensional convolutional neural network in fault diagnosis of reciprocating compressor air valve [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(4): 101-108.
- [22] 隆勇, 郭瑜, 伍星, 等. 基于振动信号分离的行星轴承故障特征提取 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(13): 78-83, 109.
- LONG Yong, GUO Yu, WU Xing, et al. Fault feature extraction of planet bearings based on vibration signal separation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(13): 78-83, 109.
- [23] 徐洲常, 王林军, 刘洋, 等. 采用改进回归型支持向量机的滚动轴承剩余寿命预测方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(3): 197-205.
- XU Zhouchang, WANG Linjun, LIU Yang, et al. A prediction method for remaining life of rolling bearing using improved regression support vector machine [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(3): 197-205.
- [24] 李建斌, 武颖莹, 李鹏宇, 等. 基于局部线性嵌入和支持向量机回归的 TBM 施工参数预测 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(8): 1426-1435.
- LI Jianbin, WU Yingying, LI Pengyu, et al. TBM tunneling parameters prediction based on locally linear embedding and support vector regression [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(8): 1426-1435.
- [25] 朱星星, 赵亮, 雷默涵, 等. 精密进给系统热误差的协同训练支持向量机回归建模与补偿方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(10): 40-47.
- ZHU Xingxing, ZHAO Liang, LEI Mohan, et al. Co-training support vector machine regression modeling and compensation for thermal error of precision feed system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(10): 40-47.

(编辑 武红江 杜秀杰)