

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614957

绝对式纳米时栅传感器栅尺污染状态自监测方法研究*

蒲红吉,戴鑫龙,杨文斌,彭 凯,何智颖

(重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054)

摘 要:针对位移传感器健康状态监测多依赖于外部信息,存在集成度低等问题,故在自主研发的绝对式纳米时栅传感器的基础上开展传感器栅尺污染状态自监测方法研究。首先,阐述了“精测+精测”绝对式纳米时栅传感器的测量原理。其次,建立了差动结构下栅尺污染时的特征误差模型,理论分析表明栅尺受到不同形态的油污污染时将引入时域偏置特征误差和频域二次谐波特征误差,建立了栅尺污染状态与时频域特征误差之间的映射关系。然后,充分利用“精测+精测”传感器的高精度、高一致性等特性构建传感器内部基准,提出了基于内部基准的时频域特征误差自提取方法。通过将两精测传感器的位移值作差,即可提取出栅尺污染状态下位移信息中引入的时频域特征误差,并对特征误差进行时频域分析及特征数据提取。最后,采用加权 K 近邻(WKNN)算法对传感器栅尺污染状态进行辨识,实现了传感器栅尺污染状态自监测。理论建模与实验分析表明:栅尺污染状态下将引入时域偏置特征误差和频域二次谐波特征误差,通过 WKNN 算法对栅尺污染状态进行辨识,辨识准确率可达 95%。该研究为提高绝对式纳米时栅传感器长期可靠性和环境适应性打下了理论基础。

关键词: 时栅位移传感器;栅尺污染;健康状态自监测;加权 K 近邻算法

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on self-monitoring method of grid-scale contamination state of absolute nano time-grating sensor

Pu Hongji, Dai Xinlong, Yang Wenbin, Peng Kai, He Zhiying

(Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Aiming at the problems that health state monitoring of displacement sensors mostly relies on external information, which causes low integration and other defects, this article conducts research on a self-monitoring method for the sensor's grid-scale contamination state based on a self-developed absolute nano time-grating sensor. First, the measurement principle of the “dual precision measurement” absolute nano time-grating sensor is elaborated. Second, a characteristic error model for grid-scale contamination under a differential structure is established. Theoretical analysis shows that when the grid-scale is contaminated by oil contaminants of different morphologies, time-domain bias characteristic errors and frequency-domain second harmonic characteristic errors are introduced, establishing the mapping relationship between the grid-scale contamination state and the time-frequency domain characteristic errors. Then, by fully utilizing the high precision and high consistency of the dual precision measuring sensors, an internal reference benchmark is constructed for the sensor, and a method for self-extracting time-frequency domain characteristic errors based on this internal reference is proposed. By subtracting the displacement values of the dual precision measuring sensors, the time-frequency domain characteristic errors introduced into the displacement information under the grid-scale contamination state can be extracted. Time-frequency domain analysis and feature data extraction are then performed on the characteristic errors. Finally, the weighted K-nearest neighbor (WKNN) algorithm is employed to identify the grid-scale contamination state of the sensor, thereby achieving self-monitoring of the sensor's grid-scale contamination state. Theoretical modeling and experimental analysis show that the grid-scale contamination state introduces time-

收稿日期:2026-02-14 Received Date: 2026-02-14

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3209400)、重庆理工大学科研创新团队项目(2023TDZ008)、重庆市自然科学基金项目(CSTB2023NSCQ-MSX0360)资助

domain bias characteristic errors and frequency-domain second harmonic characteristic errors. Using the weighted K-nearest neighbor (WKNN) algorithm to identify the grid-scale contamination state, an identification accuracy of 95% can be achieved. This study provides a theoretical foundation for improving the long-term reliability and environmental adaptability of absolute nano time-grating sensor.

Keywords: time-grating displacement sensor; grid-scale contamination; self-monitoring of health status; weighted K-nearest neighbor algorithm

0 引言

高精度位移传感器广泛应用于高端数控、航空航天、集成电路等高端装备领域^[1-4],是高端装备伺服系统中的核心功能部件,是实现精密定位的“眼睛”,其健康状态直接决定高端装备运行状态。

绝对式光栅传感器具有精度高、可靠性强等优点是目前研究最为成熟、应用最为广泛的传感器^[5-6]。该类传感器以精密刻划的栅线作为测量基准,结合编码解码技术实现绝对位置测量^[7-10]。然而在实际应用中,其健康状态易受到外部环境因素的干扰,粉尘、油污等污染物易附着于栅尺表面,造成栅线局部遮挡,导致测量精度下降,进而降低其可靠性与环境适应性,直接影响设备运行状态,严重时甚至可能造成重大安全事故。因此,国内外学者针对位移传感器健康状态监测开展了大量研究^[11-13]。Bourogauoui等^[14]利用永磁电机定子电流作为编码器的健康信息,采用小波分解和奇偶方程相结合的方法进行实时故障诊断。Slimen等^[15]采用永磁电机控制系统中的Park电流矢量作为健康信息对位置传感器进行故障诊断。Papathanasopoulos等^[16]提出了一种非侵入式的霍尔效应位置传感器故障监测方法,通过压电传感器分析电机振动信号实现位置传感器故障诊断。刘程子等^[17]利用位移传感器输出电压变化的绝对值作为健康信息,结合三角函数变换判断发生故障的位移传感器。戴聪等^[18]以位置传感器输出的电流续流时间作为健康信息,判定位置传感器是否发生位置偏移故障。综上所述,目前位移传感器的健康状态监测多依赖于外部信息,难以直接反映传感器自身的工作状态,且存在集成度低、适用性不强等问题。

本文在自主研发的绝对式纳米时栅传感器^[19]的基础上开展位移传感器健康状态自监测方法研究。传感器在实际工业现场的使用过程中,油污污染是典型影响其健康状态的因素之一。本文通过建立栅尺污染状态与时频域特征误差之间的映射关系,并充分利用“精测+精测”传感器的高精度、高一致性等特性构建传感器内部基准,提出了基于内部基准的时频域特征误差自提取方法。在此基础上,对特征误差进行时频域分析及特征数据提取,结合加权K近邻(weighted K-nearest neighbor, WKNN)算法实现栅尺污染状态的辨识。上述研究工作

利用自主位移信息处理即可实现绝对式纳米时栅传感器栅尺污染状态的自监测,集成度高,可以显著提升方法的适用性,并为传感器的可靠性与环境适应性提升打下了理论基础。

1 绝对式纳米时栅传感器测量原理

绝对式纳米时栅传感器由精测传感器A和精测传感器B组成,其中精测传感器A的周期数为 N ,精测传感器B的周期数为 $N-1$ 。绝对式纳米时栅传感器的结构示意图如图1所示。传感器A由方形栅尺和双正弦测头组成,测头与栅尺平行正对。栅尺 $S+$ 、 $C+$ 、 $S-$ 、 $C-$ 极片依次通入幅值为 A 、相位相差 90° 的四路正弦激励信号 U_{S+} 、 U_{C+} 、 U_{S-} 、 U_{C-} 。采用双正弦测头 a_1 进行信号耦合。

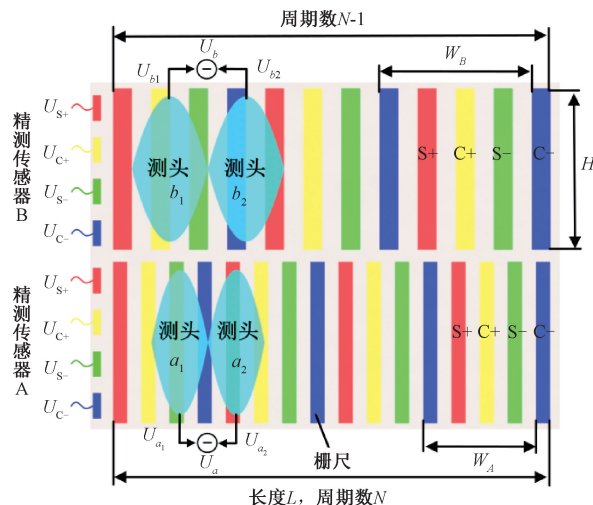


图1 绝对式时栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the absolute time-grating structure

传感器A单路正弦测头 a_1 与栅尺 $S+$ 、 $C+$ 、 $S-$ 、 $C-$ 极片构成平板电容结构,产生四路电容。采用面积积分方法可以获得四路耦合信号^[20],利用叠加方法可以获得单路正弦测头 a_1 的耦合信号 U_{a1} 为:

$$U_{a1} = A_1 \sin(\omega t) \left[1 + \cos \frac{2\pi x_a}{W_A} \right] + A_2 \cos(\omega t) \left[1 + \sin \frac{2\pi x_a}{W_A} \right] - A_3 \sin(\omega t) \left[1 - \cos \frac{2\pi x_a}{W_A} \right] - A_4 \cos(\omega t) \left[1 - \sin \frac{2\pi x_a}{W_A} \right] = A_a \sin \left(\omega t + \frac{2\pi x_a}{W_A} \right) \quad (1)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为传感器 A 的感应信号幅值, 无污染时 $A_1=A_2=A_3=A_4$; A_a 为传感器 A 的行波信号幅值; x_a 为传感器 A 精测位移值; W_A 为传感器 A 单个测量周期长度; ω 为角频率; t 为时间。

为了提高传感器在实际使用时的抗干扰能力, 传感器 A 在双正弦测头 a_1 空间上相差 π 的位置布置测头 a_2 , 形成差动结构^[21]。传感器 A 的差动耦合信号 U_a 可以表示为:

$$U_a = U_{a_1} - U_{a_2} = \sqrt{\left[2(A_1 + A_3) \cos \frac{2\pi x_a}{W_A}\right]^2 + \left[2(A_2 + A_4) \sin \frac{2\pi x_a}{W_A}\right]^2} \sin\left(\omega t + \arctan \frac{(A_2 + A_4) \sin \frac{2\pi x_a}{W_A}}{(A_1 + A_3) \cos \frac{2\pi x_a}{W_A}}\right) = 2A_a \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x_a}{W_A}\right) \quad (2)$$

同理, 传感器 B 采用差动结构时, 其差动耦合信号 U_b 为:

$$U_b = 2A_b \sin\left(\omega t + \frac{2\pi x_b}{W_B}\right) \quad (3)$$

式中: A_b 为传感器 B 的行波信号幅值; x_b 为传感器 B 精测位移值; W_B 为传感器 B 单个测量周期长度。

如图 2 所示, 将传感器 A 和传感器 B 的差动耦合信号经信号处理电路处理后, 得到整形后的方波信号 U_{ar} 与 U_{br} , 将方波信号送入 FPGA 模块中与其内部产生的同频参考信号 U_c 进行比相获得精测位移值 x_a 和 x_b 。

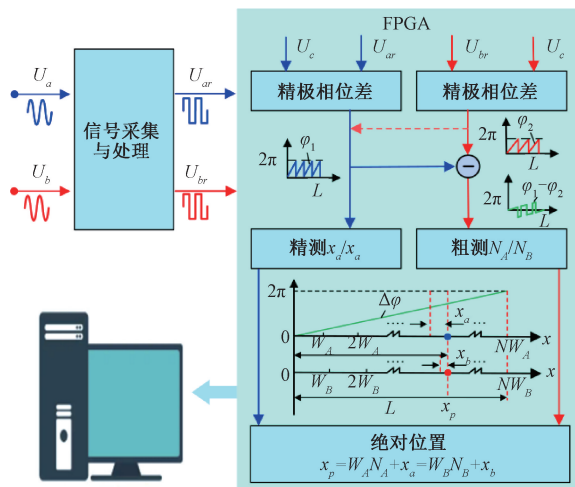


图2 信号处理流程

Fig. 2 Signal processing flow

采用传感器 A 和传感器 B 的精测相位差实现粗测, 获得测头所在位置的绝对周期数 N_A 和 N_B , 与精测位移

值结合即可获得当前的绝对位置^[22], 绝对位置表达式为:

$$x_p = N_A W_A + x_a = N_B W_B + x_b \quad (4)$$

式中: x_p 为绝对位置; N_A 、 N_B 为传感器 A 和传感器 B 的绝对周期数; x_a 、 x_b 分别为传感器 A 和传感器 B 的精测位移值。

2 栅尺污染状态特征误差建模与自提取方法

在丝杆导轨闭环伺服系统中, 纳米时栅传感器作为系统的“眼睛”, 负责监测伺服系统的工作状态, 是闭环伺服系统的关键组成部分, 其健康状态将直接决定伺服系统的运行精度。纳米时栅传感器的健康状态取决于其栅尺污染状态, 当纳米时栅传感器栅尺受到油污污染时, 将引入特征误差。因此, 需建立传感器栅尺污染状态与特征误差之间的映射关系, 再利用“精测+精测”传感器 A 和传感器 B 的高精度、高一致性等特性构建传感器内部基准进行特征误差自提取。

2.1 栅尺污染状态下特征误差建模

在实际运行中, 为保证执行机构正常运行需要定期进行润滑维护。在润滑过程中, 润滑油的渗漏或扩散易导致传感器栅尺表面受到油污污染, 进而影响测量精度, 导致输出的位移信息包含特征误差。因此需建立栅尺污染状态下的特征误差模型, 以阐明纳米时栅传感器栅尺污染状态与特征误差之间的映射关系。

前期研究表明, 当栅尺受到不同形态(不同长度、宽度、厚度)的油污污染时, 栅尺与测头之间的介质发生改变, 介电常数随之变化, 导致四路感应信号 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 幅值不等。采用单路正弦测头耦合时, 不同形态油污污染下主要引入频域一次谐波特征误差^[23]。为了提高抗干扰能力, 本文采用差动结构。由式(2)可知, 在差动结构中不同形态油污污染导致四路感应信号幅值不等时, 其特征误差可表示为:

$$e(x_a) = \frac{W_A}{\pi} \left[\arctan \frac{(A_2 + A_4) \sin \frac{2\pi x_a}{W_A}}{(A_1 + A_3) \cos \frac{2\pi x_a}{W_A}} - \arctan \frac{\sin \frac{2\pi x_a}{W_A}}{\cos \frac{2\pi x_a}{W_A}} \right] \quad (5)$$

对特征误差公式进行仿真, 当栅尺受到油污污染时, 取 $A_1=1.1$ 、 $A_2=1.16$ 、 $A_3=1.29$ 、 $A_4=1.12$, 得到差动结构的误差曲线和频谱图, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 采用差动结构耦合后, 油污污染主要引入频域二次谐波特征误差。

在此基础上, 进一步分析不同形态油污污染时的时域特征误差。纳米时栅传感器栅尺污染可划分为未污染

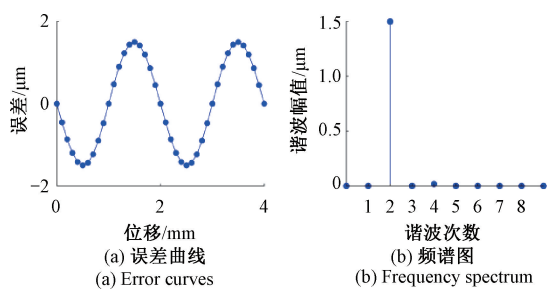


图 3 差动结构的误差曲线与频谱图

Fig. 3 Error curve and spectrum diagram of the differential structure

区与油污污染区,如图 4(a)所示。在测头进入油污污染区的过程中,油污与空气介电常数的显著差异会引起信号幅值突变,从而引入时域偏置特征误差;在测头离开油污污染区的过程中,信号幅值再次发生突变,恢复至栅尺未污染状态,时域偏置特征误差消失。当测头完全处于油污污染区时,其与栅尺之间的介质主要为油污,即为上述分析的产生频域特征误差,如图 4(b)所示。

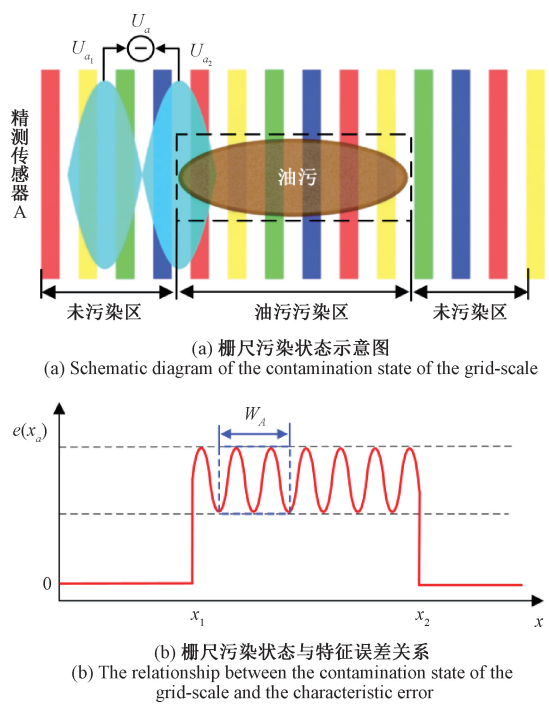


图 4 栅尺污染状态分析

Fig. 4 Analysis of the pollution status of the grid-scale

综上所述,差动结构的纳米时栅传感器受到油污污染后,其频域与时域特征误差均发生显著变化。在频域分析中,油污污染会引入频域二次谐波特征误差;而在时域分析中,油污污染会引入时域偏置特征误差。将前述特征误差表达式(5)进行简化,可得传感器特征误差表

达式为:

$$e(x_a) = \begin{cases} 0, & 0 < x_a < x_1 \cup x_a > x_2 \\ C + C_2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi x_a}{W_A} + \phi_2\right), & x_1 < x_a < x_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: C 为偏置误差; C_2 为二次谐波幅值; ϕ_2 为相位。

通过栅尺污染状态下特征误差的建模分析表明,采用差动结构,不同形态油污污染栅尺时主要引入频域二次谐波特征误差和时域偏置特征误差。因此,可以通过提取时频域特征误差来判别传感器栅尺是否受油污污染。

2.2 特征误差自提取方法

通过建立栅尺污染状态下的特征误差模型,揭示了栅尺污染与时频域特征误差之间的映射关系。本文采用自基准策略,充分利用“精测+精测”传感器高精度、高一致性等特性构建传感器内部基准,提出了一种基于内部基准的时频域特征误差自提取方法。

精测传感器 A 与精测传感器 B 的精度一致,互为内部基准。在实际运行中,当一路传感器受到不同形态油污污染时,可以利用另外一路位移值作为基准,通过对比分析两路高精度位移值,即可提取出栅尺污染状态下位移信息中引入的时频域特征误差。纳米时栅传感器栅尺受到不同形态油污污染时的影响会体现在其位移值中,如图 5 所示。

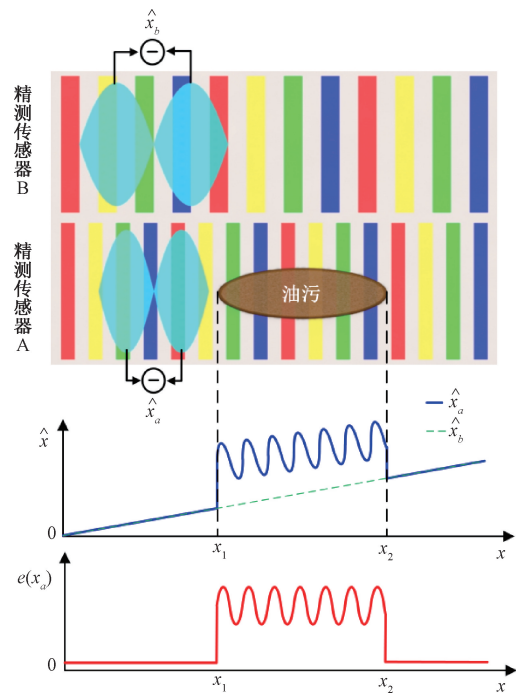


图 5 基于内部基准的特征误差自提取流程

Fig. 5 Feature error self extraction process based on internal benchmark

以栅尺受到不同形态油污污染的精测传感器 A 为例,在实际运行状态下的位移值可表示为:

$$\hat{x}_a = x + g(x_a) + e(x_a) \quad (7)$$

式中: $\hat{x}_a$ 为实测反馈位移值; x 为理论位移值; $g(x_a)$ 为伺服系统引入的控制误差; $e(x_a)$ 为精测传感器 A 栅尺受污染时的特征误差。由于精测传感器 B 是在相同工况下运行,并且栅尺未受到污染,精测传感器 B 的位移值可表示为:

$$\hat{x}_b = x + g(x_b) \quad (8)$$

将精测传感器 A 的位移值与精测传感器 B 的位移值作差。由于二者在同一工况下运行,所受伺服系统的影响一致,故 $g(x_a) = g(x_b)$ 。精测传感器 A 的特征误差为:

$$e(x_a) = \hat{x}_a - \hat{x}_b \quad (9)$$

该方法能够有效消除运行过程中引入的共模误差和噪声,提升特征误差信息的信噪比。

基于上述分析,采用绝对式位移传感器构建的内部基准可以实现油污污染状态下时频域特征误差自提取,为栅尺污染状态自监测方法打下基础。

3 栅尺污染状态自监测方法

对运行状态下“精测+精测”绝对式纳米时栅传感器的位移值进行处理,提取时频域特征误差用于传感器栅尺污染状态自监测。整个流程如图 6 所示,包括特征误差自提取、数据预处理、特征提取、栅尺污染辨识等过程。

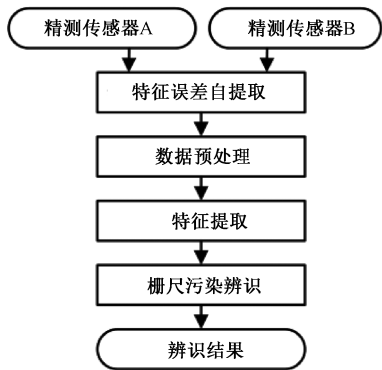


图6 数据处理流程

Fig. 6 Data processing flowchart

3.1 时频域特征误差提取

对精测传感器 A 与精测传感器 B 的位移值进行处理,获得特征误差数据,并采用均值滤波方法对特征误差数据进行降噪处理,以提高信噪比。上述理论分析表明,不同形态油污污染栅尺会引入频域二次谐波特征误差和时域偏置特征误差。针对这两种特征误差,分别采用加窗傅里叶变换和包络平均值算法进行特征提取。

频域特征误差提取方面,对滤波后的特征误差数据进行时频转换处理,可进一步揭示其频谱特征。根据传感器栅尺污染误差分析可知,差动结构下不同形态油污污染栅尺时主要引入频域二次谐波特征误差。为提取该类频谱信息,本文采用加窗傅里叶变换对特征误差数据进行数据处理,将二次谐波幅值作为栅尺污染的重要频域特征。选用矩形窗函数作为加窗函数,并设置窗口长度为传感器单个测量周期长度,加窗傅里叶变换函数表达式为:

$$F(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x - t) \cdot f(x) \cdot e^{-j\omega x} dx \quad (10)$$

式中: ω 代表频率; t 代表时间; $e^{-j\omega x}$ 为复变函数; $g(x)$ 为一个窗口函数。

时域特征误差提取方面,差动结构下不同形态油污污染栅尺主要引入时域偏置特征误差,表现为污染区的特征误差值明显高于未污染区。本文对滤波后的特征误差数据进行包络处理,并以包络平均值作为栅尺污染的时域特征。

3.2 栅尺污染状态辨识方法

基于上述提取的时域与频域特征数据,本文采用加权 K 近邻算法进行栅尺污染状态辨识。该算法是一种基于实例的懒惰学习算法,无需显式建模,具有良好的大数据适应能力。并且在低维空间中能有效规避维度灾难问题,进而提升近邻判别的准确度。加权 K 近邻算法是对普通 K 近邻(K-nearest neighbor, KNN)算法的扩展与改进,通过为每个邻居分配适当的权重,解决了普通 K 近邻算法在分类时将不同邻居类别同等对待的问题,能更准确地反映不同邻居对分类结果的影响,该算法结构简单、便于集成^[24-26]。

加权 K 近邻算法的基本原理为:设 A、B 为训练样本集, C 为测试样本集,通过欧式距离计算出 C 在 A、B 中的距离数据集 d,测试样本与训练样本间欧式距离值的计算公式为:

$$d(x_i, y_j) = \left(\sum_{k=1}^n |x_{ik} - y_{jk}|^2 \right)^{1/2} \quad (11)$$

式中: x_i 为测试样本; y_j 为训练样本; n 为数据维度; k 为样本编号。

该算法考虑到不同邻居的重要性,从而更准确地进行分类预测,具体的决策计算公式为:

$$\hat{y} = \operatorname{argmax}_{c \in C} \sum_{i=1}^K \omega_i \cdot I(y_i = c) \quad (12)$$

式中: C 为类别总数; y_i 为第 i 个近邻样本的类别标签; $I(y_i = c)$ 为指示函数,其定义为:

$$I(y_i = c) = \begin{cases} 1, & y_i = c \\ 0, & y_i \neq c \end{cases} \quad (13)$$

用于统计近邻样本中属于类别 c 的数量; ω_i 为

第 i 个近邻样本的权重系数,通常由样本间的距离 $d(x_i, y_j)$ 决定,且满足距离越小权重越大的单调递减关系。该权重反映了不同近邻样本对预测结果的影响程度,其计算公式为:

$$\omega_i = \frac{1}{d(x_i, y_j)}$$

(14)

栅尺污染状态辨识流程如图 7 所示,首先建立频域与时域特征数据样本集,每个样本由频域特征与时域特征构成,形成二维特征向量,并将样本集划分为训练集与测试集。然后计算测试样本与训练样本之间的欧式距离形成数据集 d ,将数据集 d 按照递增规则排序,选取前 K 个距离值,根据距离计算为各样本分配权重,统计 K 个样本中各类别的加权总权重,将测试样本归为权重最高的类别。

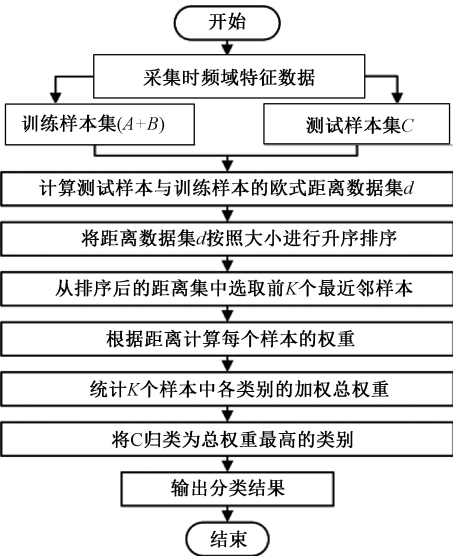


图 7 加权 K 近邻算法流程

Fig. 7 Flowchart of the weighted K-nearest neighbor calculation method

4 平台搭建与栅尺污染状态自监测实验结果

4.1 实验平台搭建

为了验证理论分析的真实准确性,搭建了如图 8 所示的实验平台,包括上位机:用于数据采集、分析和控制指令下发;伺服驱动器:作为伺服系统的核心控制单元,将控制指令转化为精确的电能输出,驱动伺服电机实现高性能运动控制;伺服电机与丝杆导轨装置:作为系统动力源,将电能转化为机械能,通过联轴器驱动丝杆旋转,将旋转运动转换为导轨滑台的精密直线运动;绝对式纳米时栅传感器:提供实时反馈位移值。纳米时栅传感器的测头安装于丝杆导轨载物平台上,选择高速机床常用

润滑油 ISO VG22 作为污染源对传感器栅尺进行污染,模拟传感器栅尺受到不同形态的油污污染。

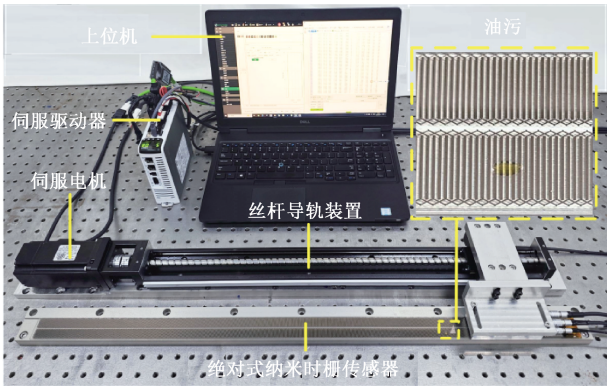
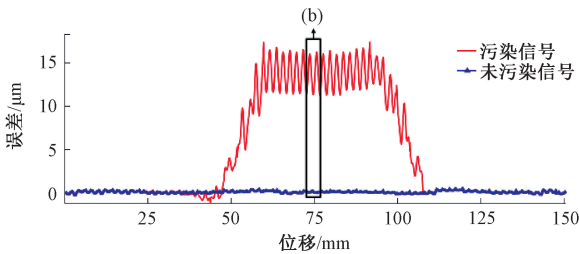


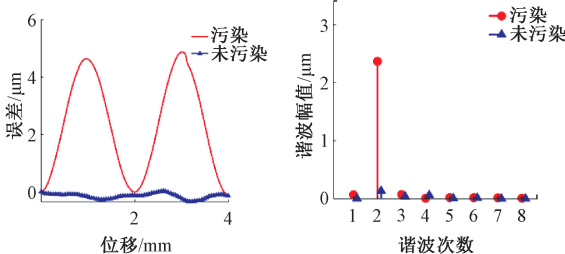
图 8 实验平台
Fig. 8 Experimental platform

4.2 实验结果与分析

为了验证加权 K 近邻算法对纳米时栅传感器栅尺污染状态的分类性能,需采集充足的训练样本进行实验验证。利用搭建的实验平台,将位移传感器作为反馈,在运行速度为 1 000 mm/min 状态下,分别采集栅尺未污染及受不同形态油污污染时的数据各 100 组。如图 9(a) 所示为栅尺未污染与栅尺污染状态下的其中一组数据。图 9(b) 所示为一个完整的测量周期,对该周期内的误差信号进行频域分析,提取该周期内的频谱信息,如图 9(c) 所示。实验结果表明,采用差动结构,栅尺受油污污染时会引入频域二次谐波特征误差,与理论分析一致。



(a) 栅尺污染特征误差数据图
(a) Data plot of characteristic error induced by grid-scale contamination



(b) 周期内栅尺污染误差图
(c) 周期内频谱图
(b) contamination within the period (c) Spectrum diagram within the period

图 9 误差曲线图
Fig. 9 Error curve graph

进一步对该数据进行时域特征提取,分析栅尺未污染状态与油污污染状态下的时域特征误差变化规律,如图 10 所示。实验结果表明,差动结构下栅尺受油污污染时会引入时域偏置特征误差,与理论分析一致。

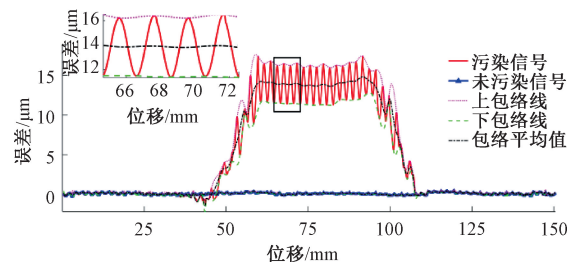


图 10 误差包络曲线图
Fig. 10 Error envelope curve graph

在此基础上,对 100 组栅尺未污染数据及受到不同形态油污污染的数据进行处理,分别提取频域二次谐波特征误差和时域偏置特征误差,将所提取的频域和时域特征作为加权 K 近邻算法的数据样本集,如图 11 所示。

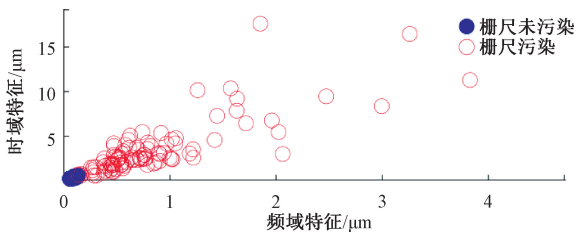


图 11 数据样本集
Fig. 11 Data sample set

为了保证实验结果的准确性,将数据样本按比例划分为 80%、60%、40% 的训练样本集,并将相应的剩余样本作为测试样本集。通过交叉验证的方法,确定最优的 K 值为 5,利用加权 K 近邻算法对测试样本进行分类。为降低随机误差,实验重复 5 次独立运行,实验结果取 5 次实验平均值,如表 1 所示。

表 1 分类结果
Table 1 Classification result (%)

分类方法	训练样本集占比		
	40	60	80
加权 K 近邻算法	89.17	92.25	95.00

实验结果表明,增加训练样本占比可提升辨识准确率;在训练样本占比为 80% 时,辨识准确率达到 95%。实验构建的栅尺污染数据集包含了多种典型的油污形态,当传感器栅尺受到微小油污污染时,与正常状态下的特征误差相比区分度较低,从而影响了传感器栅尺污染的辨识准确率。

5 结 论

本文以绝对式纳米时栅位移传感器为研究对象开展了栅尺污染状态自监测方法研究。首先阐述了传感器的测量原理与结构,建立了栅尺污染状态与时频域特征误差之间的映射关系;利用内部基准实现时频域特征误差的自提取与特征分析;最后结合加权 K 近邻算法完成栅尺污染状态的有效判别,并通过实验验证了该算法的准确性及适用性,实现了绝对式纳米时栅传感器栅尺污染状态自监测。理论与实验研究表明:1) 通过“精测+精测”结构构建传感器内部基准,建立了栅尺污染与时频域特征误差之间的映射关系。当栅尺受到不同形态油污污染时,特征误差数据中将会引入频域二次谐波特征误差和时域偏置特征误差;2) 充分利用“精测+精测”传感器的高精度、高一致性等特性构建传感器内部基准,提出了基于内部基准的时频域特征误差自提取方法,可有效消除伺服系统带来的共模误差;3) 以频域二次谐波特征误差和时域偏置特征误差作为判别指标,结合加权 K 近邻算法可实现运行状态下传感器栅尺污染状态自监测,识别准确率达 95%。后续将进一步开展绝对式纳米时栅传感器栅尺污染状态判别算法的系统集成与栅尺受微小油污污染的辨识方法研究。

参考文献

[1] 周亮,王振环,孙东辰,等. 现代精密测量技术现状及发展[J]. 仪器仪表学报,2017, 38(8):1870-1878.
ZHOU L, WANG ZH H, SUN D CH, et al. Present situation and development of modern precision measurement technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8):1870-1878.

[2] 谭久彬. 超精密测量是支撑光刻机技术发展的基石[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3):1-7.
TAN J B. Ultra-precision measurement: The cornerstone of the lithography technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3):1-7.

[3] OZTEMELE, GURSEV S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(1): 127-182.

[4] ROVATI L, CECILIA L D, CATTINI S. On the feasibility of absolute distance measurement by using optical feedback into a superluminescent diode cavity [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(5): 2495-2506.

[5] 张建辉,陈震林,张帆. 绝对式光电编码器的编码理论研究进展[J]. 振动、测试与诊断,2021, 41(1):1-12,197.
ZHANG J H, CHEN ZH L, ZHANG F. Advances in

- coding theory of absolute optical encoders[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(1): 1-12, 197.
- [6] WANG SH T, LUO L B, ZHU J H, et al. An ultra-precision absolute-type multi-degree-of-freedom grating encoder[J]. *Sensors*, 2022, 22(23): 9047.
- [7] 高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 741-752.
- GAO X, LI SH H, MA Q L, et al. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741-752.
- [8] 任雪玉, 黄垚, 薛梓, 等. 一种光栅莫尔信号数字锁相细分方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 26-34.
- REN X Y, HUANG Y, XUE Z, et al. A digital phase-locking subdivision method for grating Moiré signal[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 26-34.
- [9] 李星辉, 崔璨. 光栅干涉精密纳米测量技术[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(17): 2592-2611.
- LI X H, CUI C. Grating interferometric precision nanometric measurement technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(17): 2592-2611.
- [10] LASHMANOV O U, VASILEV A S, VASILEVA A V, et al. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale[J]. *Measurement*, 2018, 123: 226-234.
- [11] 李洁, 黄文新, 蔡一鸣, 等. 基于DFPMM的位置传感器故障诊断与容错控制[J]. *航空学报*, 2024, 45(10): 265-276.
- LI J, HUANG W X, CAI Y M, et al. Fault diagnosis and fault tolerant control of position sensor based on DFPMM[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(10): 265-276.
- [12] 李红梅, 姚宏洋, 王萍. PMSM驱动系统位置传感器故障在线诊断与自适应容错控制[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(S2): 228-235.
- LI H M, YAO H Y, WANG P. Position sensor online fault diagnosis and adaptive fault-tolerant control of PMSM drive system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(S2): 228-235.
- [13] 张宏伟, 王新环, 荆鹏辉. 绕组分段永磁直线电机切换位置传感器故障诊断及容错控制[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(11): 1745-1752.
- ZHANG H W, WANG X H, JING P H. Fault diagnosis and fault-tolerant control of switching position sensor for segment winding permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(11): 1745-1752.
- [14] BOUROGAOUI M, SETHOM H B A, BELKHODJA I S. Real-time encoder faults detection and rotor position estimation for permanent magnet synchronous motor drives fault tolerant sensorless control using digital signal controller[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2017, 131: 253-267.
- [15] SLIMEN S B, BOUROGAOUI M, SETHOM H B A. A new approach for effective position/speed sensor fault detection in PMSM drives[C]. *International Conference on ELECTRIMACS*, 2020: 359-372.
- [16] PAPATHANASOPOULOS D A, GIANNOUSAKIS K N, DERMATAS E S, et al. Vibration monitoring for position sensor fault diagnosis in brushless DC motor drives[J]. *Energies*, 2021, 14(8): 2248.
- [17] 刘程子, 王加伟, 杨艳, 等. 混合径向磁轴承非对称位移传感器容错控制[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(9): 78-85.
- LIU CH Z, WANG J W, YANG Y, et al. Fault-tolerant control of asymmetric displacement sensor for hybrid radial magnetic bearing [J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(9): 78-85.
- [18] 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 ZH Y, LI J. Mechanical deviation fault diagnosis and tolerant control on position sensor in switched reluctance motor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(9): 12-19.
- [19] PENG K, YU ZH CH, LIU X K, et al. Features of capacitive displacement sensing that provide high-accuracy measurements with reduced manufacturing precision[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 7377-7386.
- [20] PU H J, CHEN L, FAN X CH, et al. An absolute time-grating linear displacement sensor with a multilayer cascade structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(10): 16684-16692.
- [21] 彭凯, 于治成, 刘小康, 等. 单排差动结构的新型纳米时栅位移传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(3): 734-740.
- PENG K, YU ZH CH, LIU X K, et al. A novel time-grating displacement sensor with single-row differential structure[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3): 734-740.
- [22] 刘小康, 梅现富, 蒲红吉, 等. 基于分时方法的高精度反射绝对式纳米时栅位移传感器设计[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9): 97-105.
- LIU X K, MEI X F, PU H J, et al. Design of high-

- precision reflective absolute nanometer time-grating displacement sensor based on time-division method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 97-105.
- [23] 蒲红吉, 余志立, 于治成, 等. 绝对式纳米时栅传感器栅尺污染误差分析与抑制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8):135-144.
- PU H J, YU ZH L, YU ZH CH, et al. Analysis of grid-scale contamination error and suppression method for absolute time-grating sensor of grid-scale contamination error and suppression method for absolute time-grating sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 135-144.
- [24] 罗森林, 赵惟肖, 潘丽敏. 结合加权KNN和自适应牛顿法的稳健 Boosting 方法[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(1):112-120.
- LUO S L, ZHAO W X, PAN L M. Robust Boosting method combing weighted KNN and adaptive newton method[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(1):112-120.
- [25] WAN B T, SHENG ZH X, ZHU W Q, et al. Compactness-weighted KNN classification algorithm[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2024, 15(9): 229-238.
- [26] 蒋卫恒, 段耀星, 李明玉, 等. 一种基于维度加权盲K近邻算法的数字预失真技术[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2):446-454.
- JIANG W H, DUAN Y X, LI M Y, et al. A digital predistortion technique based on the dimension weighted blind K-nearest neighbor algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 446-454.

作者简介



蒲红吉, 2011年和2014年于重庆理工大学获得学士和硕士学位, 2020年于西安交通大学获得博士学位, 现为重庆理工大学副教授, 主要研究方向为精密测量技术与智能传感器。

E-mail: phongji@126.com

Pu Hongji received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing University of Technology in 2011 and 2014, respectively, and his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2020. He is currently an associate research fellow at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision measurement technology and intelligent sensor.



戴鑫龙, 2022年于重庆理工大学获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为传感器技术和智能仪器。

E-mail: dxi_cqut@163.com

Dai Xinlong received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2022. He is currently a master's student at Chongqing University of Technology. His main research interests include sensor technology and intelligent instrument.



何智颖(通信作者), 2016年和2022年于西南交通大学分别获得学士和博士学位, 现为重庆理工大学助理研究员, 主要研究方向为信号分析、数值仿真与自动化控制。

E-mail: he_zhiying@cqut.edu.cn

He Zhiying (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Southwest Jiaotong University in 2016 and 2022, respectively. He is currently an assistant research fellow at Chongqing University of Technology. His main research interests include signal analysis, numerical simulation, and automatic control.