

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412582

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*

蒲红吉, 余志立, 于治成, 骆艺, 郑方燕

(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:针对服役状态下油污降低位移传感器精度和可靠性的问题,本文基于绝对式纳米时栅传感器,开展了栅尺油污污染误差分析与抑制方法研究。首先阐述了绝对式纳米时栅传感器测量原理;其次建立了栅尺油污污染的数学理论模型和电场仿真模型。通过理论和仿真分析表明:均匀油污污染对传感器没有影响,非均匀油污污染主要引入一次谐波误差,并且误差随着油污厚度和宽度的增加而增加;最后搭建实验平台验证了以上理论分析的正确性。同时提出差动结构,有效抑制了一次谐波误差,提高了传感器抗污能力。研究油污造成的误差影响对提高传感器环境适应性有重要意义,同时也为提高传感器长期可靠性和增强环境适应性提供了理论基础。

关键词: 时栅位移传感器;油污污染;误差分析;电场仿真;谐波抑制

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

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

Pu Hongji, Yu Zhili, Yu Zhicheng, Luo Yi, Zheng Fangyan

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

Abstract: To address the problem of oil pollution reducing the accuracy and reliability of displacement sensor under service condition, this article studies the oil pollution error analysis and suppression method of grid scale based on an absolute time-grating sensor. Firstly, the measuring principle of the absolute time-grating sensor is described. Secondly, the mathematical theory model and the electric field simulation model of grid-scale oil pollution are formulated. The theoretical and simulation analysis shows that the uniform oil pollution has no effect on the sensor, the non-uniform oil pollution mainly introduces the first harmonic error, and the error increases with the increase of the thickness and width of the oil pollution. Finally, an experimental platform is set up to verify the correctness of the above theoretical analysis. Meanwhile, the differential structure is proposed, which effectively inhibits the first harmonic error and improves the anti-fouling ability of the sensor. The study of the error effect caused by oil pollution is of great significance to improve the environmental adaptability of sensors and also provides a theoretical basis for improving the long-term reliability of sensors and enhancing environmental adaptability.

Keywords: time-grating displacement sensor; oil contamination pollution; error analysis; electric field simulation; harmonic suppression

0 引言

绝对式位移传感器作为精密高端装备的关键功能部

件,在工业自动化、航空航天、医疗器械、机器人技术等领域^[1-3]中发挥着至关重要的作用。随着科技的不断进步和工程应用的需求不断增长,对位移传感器长期可靠性和环境适应性的要求也日益提高。因此,对于位移传感

收稿日期:2024-03-05 Received Date: 2024-03-05

基金项目:国家自然科学基金青年项目(62103069)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202101121)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-K202101104)资助

器技术的研究和发展显得尤为重要。目前,在绝对式位移传感器的研究中绝对式光栅尺作为位移传感器中一个重要研究方向备受关注。

绝对式光栅尺一种是利用光线扫描码盘上的专用编码码道,以确定被测物体的绝对位置的传感器^[4-7]。因其测量精度高、结构简单、易于进行大量程测量而被广泛应用于高精度测量领域。根据编码方式可以分为多码道编码和单码道编码:多码道编码是由2条码道组成,一条为绝对码道,另一条为增量码道。绝对码道可以实现绝对式光栅的绝对定位,增量码道实现信号的高细分,提高传感器的分辨率,且码道越多分辨率就越高。而后发展的单码道编码是具有绝对位置信息的一条码道,将不同宽度和间距的条纹刻画在栅尺上,利用相邻条码的顺序关系来实现绝对定位。绝对式光栅尺通过二进制编码模式获得绝对信息,如格雷码^[8-9]和伪随机码,这些码型编解码方式都比较复杂。目前光栅主流的解码方式是通过图像传感器^[10-12]捕获光学信号,将其转换为电压信号,也需要一套复杂的解码系统。且光栅尺实现高精度测量依赖于栅线的刻画,对工艺要求十分苛刻。

由于工作环境的复杂性,传感器在使用过程中栅尺容易受到污染,会影响传感器精度,降低传感器长期使用的可靠性,甚至可能引起严重的安全事故。作为最主要的污染源,研究油污污染对深入研究污染物对传感器的影响有重要的意义^[13]。国内外也有学者对绝对式光栅尺栅尺污染进行了研究^[14-16],陈文艺等^[17]提出了一种抗条码尺磨损的新的图像处理算法,通过对图像进行预处理以及相位曲线拟合实现了条码尺位置的可靠检测。Yu等^[18]开发了一种用于基于单个图像传感器的角位移测量的抗污点算法,当使用8位编码光栅盘时,对于覆盖面积小于4条栅线的污染具有防污性能。HEIDENHAIN(海德汉)公司开发的ERA系列准绝对位移测量设备采用光学扫描模块产生扫描信号,虽然钢带栅尺可以抵抗轻微污渍(例如指纹、水渍)的干扰,但当大量油污大面积覆盖测量元件表面时,仍然会导致测量结果出现误差。刘小康等^[19-20]提出了一种新型的传感器—纳米时栅传感器。绝对式纳米时栅传感器利用单列式传感原理设计差极结构,通过相位差实现绝对测量。传感器通过构建匀速交变电场将对空间位移变化量转化为对时间变化量的测量,其具有超高精度和高分辨率等特点,不用靠密集的栅线刻画来提高精度,降低了制造难度,而且编解码简单。

目前绝对式纳米时栅开展了批量应用,油污污染是影响传感器可靠性的一个重要因素,需要对栅尺污染问题研究,提高传感器抗污性能。本文将油污污染划分为均匀油污污染和非均匀油污污染,对其进行了研究,分析了不同油污污染长度、宽度以及厚度引入的误差影响。研究表

明:均匀油污污染不会对传感器造成明显影响,而非均匀性油污会引入一次和二次谐波误差,且误差大小与油污污染长度、宽度以及厚度有关系。通过这些研究工作,改进了纳米时栅传感器的性能,增强其抗污染能力。为纳米时栅传感器的污染误差研究提供理论支持,同时为提高传感器长期可靠性,增强环境适应性提供理论基础。

1 绝对式纳米时栅传感器测量原理

1.1 纳米时栅原理

绝对式纳米时栅传感器采用精测结合粗测的方式实现绝对位移测量。如图1所示,传感器通过构建周期数为 N 的单列式传感器A获得精测值,采用传感器A和构建周期数为 $N-1$ 的单列式传感器B的相位差实现粗测,两者结合获得绝对位移值。

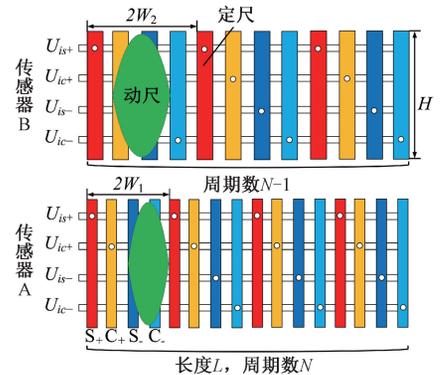


图1 绝对式纳米时栅传感器结构

Fig. 1 Absolute time-grating sensor structure

构建的纳米时栅传感器A包括定尺和动尺两部分,定尺 S_+ 、 C_+ 、 S_- 、 C_- 依次通入幅值为 A 、相位相差 90° 的4路正弦激励信号 U_{is+} 、 U_{ic+} 、 U_{is-} 、 U_{ic-} 。动尺由两块半正弦型极片组成,保持一定间隙,与定尺极片正对进行信号耦合。

以传感器A为例,动尺与定尺组成差动平板电容结构,如图2(a)所示将产生 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 4个电容,根据电容决定式 $C = \epsilon S/d$, ϵ 是电容极板中间介质的相对介电常数, S 为电容极板间的正对面积, d 为电容极板间的距离。可知动定尺间的正对面积将直接影响电容值,动尺上感应电极产生的感应信号与两个平行电容板间的正对面积成线性关系。以 S_+ 路为例,如图2(b)所示,重合面积的变化可视为一个正弦函数与矩形的变上下线积分。根据等效示意图2(c)采用面积积分方法^[21]获得求得单路感应信号 U_{os+} 为:

$$U_{os+} = \frac{W_1 H}{\pi \sqrt{S^2 + \left(\frac{d}{R\omega\epsilon}\right)^2}} A \sin(\omega t) \left[1 + \cos \frac{\pi x_1}{W_1} \right] \quad (1)$$

式中: W_1 为传感器 A 半个周期长度; H 为极片长度; S 为定尺 S_+ 路与动尺的正对面积; ω 为角频率; R 为等效电路电阻。

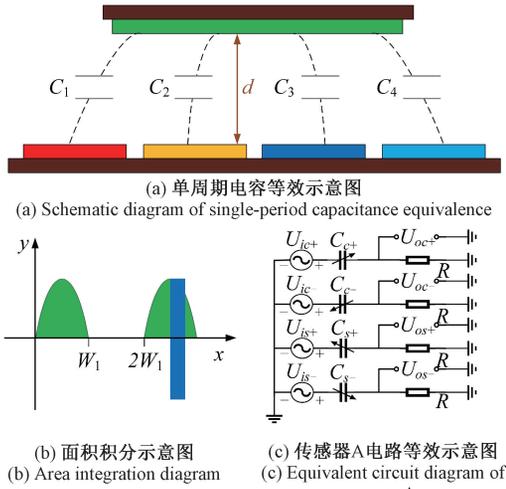


图 2 等效电路示意图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram

令 $A_1 = W_1 H A / \pi \sqrt{S^2 + \left(\frac{d}{R \omega \epsilon}\right)^2}$, 根据叠加原理求得行波信号 U_a 为:

$$U_a = A_1 \sin(\omega t) \left[1 + \cos \frac{\pi x_1}{W_1} \right] + A_2 \cos(\omega t) \left[1 + \sin \frac{\pi x_1}{W_1} \right] - A_3 \sin(\omega t) \left[1 - \cos \frac{\pi x_1}{W_1} \right] - A_4 \cos(\omega t) \left[1 - \sin \frac{\pi x_1}{W_1} \right] = A_a \sin \left(\omega t + \frac{\pi x_1}{W_1} \right) \quad (2)$$

式中: A_1, A_2, A_3, A_4 为感应信号幅值, 无污染时 $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$; A_a 为行波信号幅值; x_1 为位移值。 U_a 相位的变化与位移值的变化成线性关系, 通过脉冲插补求得相位值即能求得位移值实现精测。

1.2 绝对定位原理

为了实现绝对位移测量, 构建了周期数为 $N-1$ 的传感器 B, 同理可得耦合信号为:

$$U_b = A_b \sin \left(\omega t + \frac{\pi x_2}{W_2} \right) \quad (3)$$

式中: A_b 为行波信号幅值; x_2 为位移值; W_2 为传感器 B 半个周期长度。用 $\varphi_1 - \varphi_2$ 表示相位差计算绝对整周期数实现粗测。相位差可以进行如下变化得到 $\Delta\varphi$ 。

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2, & \varphi_1 - \varphi_2 \geq 0 \\ \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi, & \varphi_1 - \varphi_2 < 0 \end{cases} \quad (4)$$

如图 3 所示, 可知在测量范围内绝对位移值 x 与相位差 $\Delta\varphi$ 成线性关系。

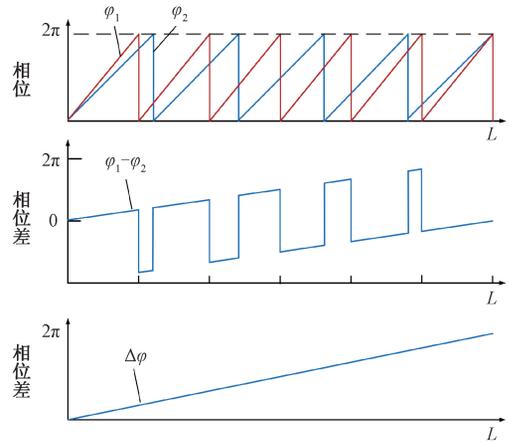


图 3 绝对位移定位方法

Fig. 3 Absolute displacement positioning method

用 M 表示上电后传感器 A 的绝对整周期数:

$$M = \text{int} \left[(\Delta\varphi \cdot L) / (2\pi \cdot W_1) \right] \quad (5)$$

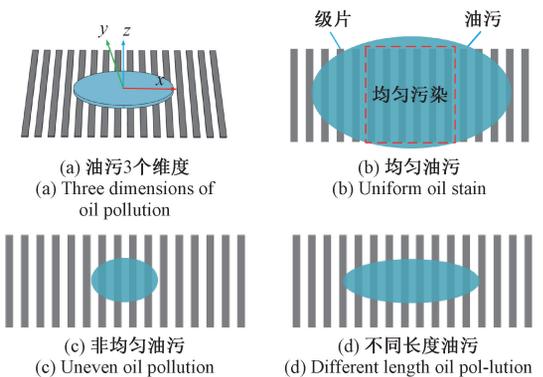
则绝对位移值 x_a 表示为:

$$x_a = \frac{L}{N} \left(M + \frac{\varphi_1}{2\pi} \right) \quad (6)$$

式中: L 为传感器总长; N 为周期数。

2 油污污染误差机理

在实际工作中, 主要有飞溅润滑、压力润滑、重力润滑等润滑方式, 在润滑过程中容易导致油污污染栅尺。当油污覆盖在栅尺上时, 会引入测量误差, 将油污污染种类分为均匀油污污染和非均匀油污污染两种。其中均匀油污污染是油污汽化后喷洒在栅尺上形成一层均匀的油膜, 覆盖在整个栅尺极片上如图 4(b) 所示; 非均匀油污污染是油污成点状滴落在栅尺极片上, 只覆盖栅尺的部分区域, 从 3 个维度如图 4(a) 对非均匀油污污染进行讨论: 1) 不同油污长度的误差规律如图 4(c)、(d) 所示; 2) 不同油污宽度的误差规律如图 4(c)、(e) 所示; 3) 不同油污厚度的误差规律如图 4(d)、(f) 所示。



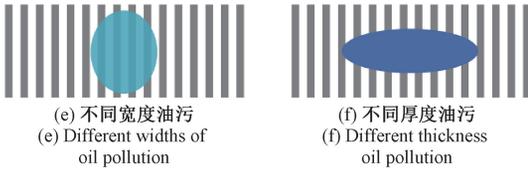


图4 油污污染分类示意图

Fig. 4 Oil pollution classification diagram

传感器动定尺构成差动平板电容结构,传感器正常工作时中间介质为空气,其相对介电常数值为1。如图5所示,当动尺极片和定尺极片之间有油污作为介质时,介质的改变导致相对介电常数发生变化,电容值也将发生变化。

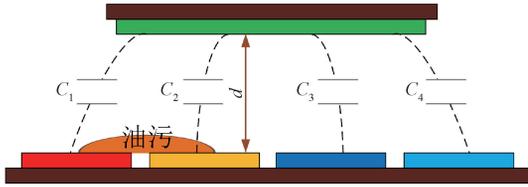


图5 油污覆盖电极剖面图

Fig. 5 Oil covered electrode profile

由式(1)可知,经过传导后的感应信号幅值变化,出现幅值不等的情况,由此产生误差。于是将式(2)行波信号 U_a 变式为:

$$U_a = \sqrt{\left[(A_1 - A_3) + (A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1} \right]^2 + \left[(A_2 - A_4) + (A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1} \right]^2} \sin \left[\omega t + \arctan \frac{(A_2 - A_4) + (A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1}}{(A_1 - A_3) + (A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1}} \right] \quad (7)$$

求得位移值:

$$x' = \frac{W_1}{\pi} \arctan \frac{(A_2 - A_4) + (A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1}}{(A_1 - A_3) + (A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1}} \quad (8)$$

误差则可以表示为:

$$e(x) = x' - x =$$

$$\frac{W_1}{\pi} \left[\arctan \frac{(A_2 - A_4) + (A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1}}{(A_1 - A_3) + (A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1}} - \arctan \frac{\sin \frac{\pi x}{W_1}}{\cos \frac{\pi x}{W_1}} \right] \quad (9)$$

根据式(9)得出感应幅值不等时将引入基波和直流分量。接下来,我们将对均匀油污污染和非均匀油污污染进行讨论。

2.1 均匀油污误差分析

如图4(b)所示,汽化后的油污在栅尺上形成了一层均匀的油膜,覆盖整个极片。当动尺和定尺相互移动时,油膜覆盖整个极片,虽然中间介质发生了改变,但在移动中相对介电常数保持定值不变。根据式(9)可知,4路感应信号的幅值发生改变,但4路感应信号幅值相等,即 $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$, 则不会引入其他的误差。而在油污边缘处空气和油污同时作为介质的情况与非均匀油污污染情况一致,将在下文进行分析。

2.2 非均匀油污污染分析

非均匀油污污染将使电容极板间的空气与油污同时作为介质,动定尺相互移动时,中间介质改变引起电容值 C_1, C_2, C_3, C_4 的变化,最终导致耦合后的行波信号幅值不等,从而引入误差。下面将从油污污染的长度、宽度和厚度3个维度对非均匀油污污染进行分析。

1) 不同长度油污污染

油污污染极片增加将导致感应信号幅值不等,以图6(a)为例,定义油污长度 $0 < x < W_1/2$ 为污染 S_+ ; $0 < x < W_1$ 为污染 S_+, C_+ ; $0 < x < 3W_1/2$ 为污染 S_+, C_+, S_- ; $0 < x < 2W_1$ 为污染 S_+, C_+, S_-, C_- 。油污污染不同极片数时,将造成

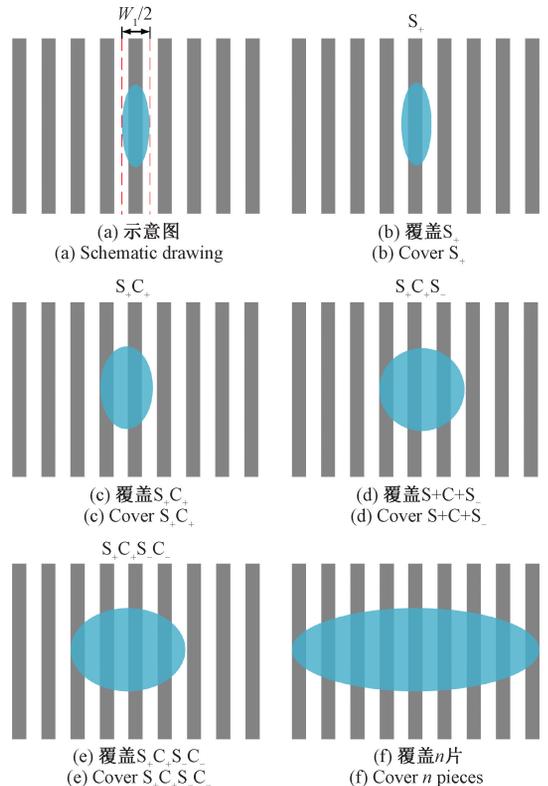


图6 不同长度油污示意图

Fig. 6 Different lengths of oil pollution diagram

1 路、2 路、3 路、4 路幅值不等。

由于传感器每 4 片极片组成 1 个周期,以此类推,当油污覆盖 $4n+1, 4n+2, 4n+3, 4n+4$ (n 取正整数) 个级片时,与覆盖 1 片、2 片、3 片、4 片级片的误差机理一致,同样造成 1 路、2 路、3 路、4 路幅值不等。对以上 4 种幅值不等情况进行分析,分别取 $A_1 = 1.05, A_2 = 1.0, A_3 = 1.0, A_4 = 1.0$; $A_1 = 1.05, A_2 = 1.1, A_3 = 1.0, A_4 = 1.0$; $A_1 = 1.05, A_2 = 1.1, A_3 = 1.2, A_4 = 1.0$; $A_1 = 1.05, A_2 = 1.1, A_3 = 1.2, A_4 = 1.15$ 。可以得到如图 7 所示的误差曲线和频谱图。

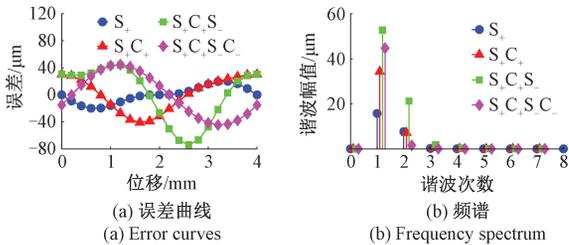


图 7 幅值不等误差频谱图

Fig. 7 Amplitude unequal error spectrum diagram

由图 7 可知,油污长度不同主要会引入以一次为主的谐波误差。

2) 不同宽度油污污染

如图 8 所示,保持油污长度、厚度一致,对不同宽度油污进行研究。油污宽度增加,导致各极片受污染面积差值增大,引起更大的幅值变化。

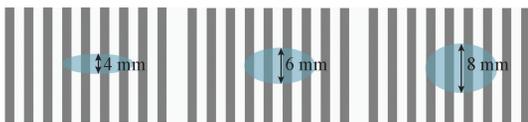


图 8 不同宽度油污示意图

Fig. 8 Different widths of oil pollution diagram

分析油污宽度 l 为 4 mm、6 mm、8 mm 时的误差,将油污宽度的变化等效为幅值的变化。

以上述 4 路幅值不等的情况为例,即 $A_1 = 1.05, A_2 = 1.1, A_3 = 1.2, A_4 = 1.15$ 。依次取 $A_1 = 1.1, A_2 = 1.16, A_3 = 1.3, A_4 = 1.22$ 以及 $A_1 = 1.14, A_2 = 1.2, A_3 = 1.38, A_4 = 1.25$ 共 3 组数据进行对比,得到如图 9 的误差曲线和频谱图。

由图 9 可知,油污宽度的增加引起幅值变化增大,一次谐波误差也随之增加。

3) 不同厚度油污污染

如图 10 所示,保持油污长度、宽度一致,对不同厚度油污进行研究。随着油污厚度的增加导致电容极板间的介电常数变化,电容值发生变化造成感应幅值差值增大,

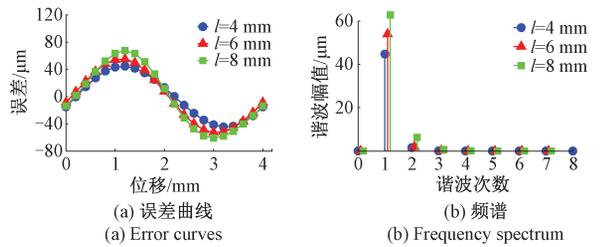


图 9 不同宽度油污误差频谱图

Fig. 9 Oil pollution error spectrum of different widths

对传感器误差的影响也将随之增大。

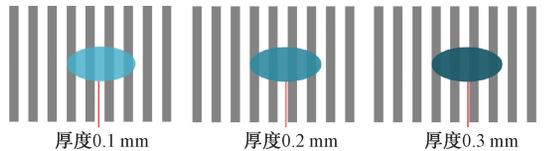


图 10 不同厚度油污示意图

Fig. 10 Different thickness of oil pollution diagram

分析油污厚度 h 为 0.1 mm、0.3 mm、0.5 mm 时的误差,同样将油污厚度的变化等效为幅值变化的程度,以上述 4 路幅值不等的情况为例,即 $A_1 = 1.05, A_2 = 1.1, A_3 = 1.2, A_4 = 1.15$ 。依次取 $A_1 = 1.1, A_2 = 1.18, A_3 = 1.31, A_4 = 1.22$ 以及 $A_1 = 1.17, A_2 = 1.3, A_3 = 1.45, A_4 = 1.26$ 共 3 组数据进行对比,得到如图 11 的误差曲线和频谱图。

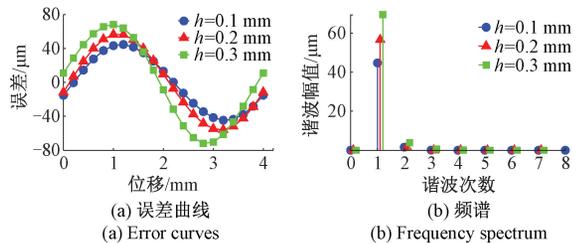


图 11 不同厚度油污误差频谱图

Fig. 11 Oil pollution error spectrum of different thickness

由图 11 可知,油污厚度的增加引起幅值差值增大,一次谐波误差也随之增加。

3 仿真分析

基于纳米时栅测量理论,本章通过建立如图 12 的仿真模型对传感器进行电场仿真分析。在动尺极片和定尺极片之间增加油污介质,选择常用机床润滑油进行仿真,润滑油是一种复杂的混合物,可以看作是弱极性液体电介质,介电常数介于 2.1~2.3。本文建立了等厚油污的简化模型,通过电场仿真分析均匀油污污染和非均匀油污污染中不同油污长度、宽度以及厚度条件下引入的误

差,总结栅尺油污污染对传感器误差影响规律。

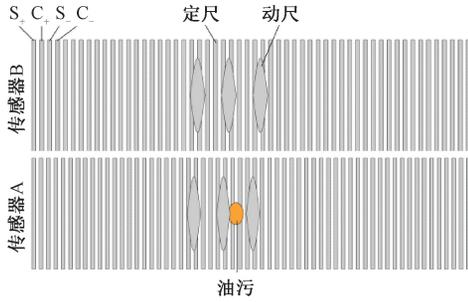


图 12 纳米时栅仿真模型

Fig. 12 Simulation model of time-grating

定尺极片 S_+ 、 C_+ 、 S_- 、 C_- 依次通入 4 路激励。仿真研究中,将动尺极片设置为悬浮电位,为了获得更准确的仿真结果,网格设置为较细化的单元大小。仿真模型相关参数设置如表 1 所示。

表 1 绝对式纳米时栅模型参数

Table 1 Absolute nanogrid model parameters

参数名	参数值
传感器 A 整周对极数	15
传感器 A 定尺极片长	11 mm
传感器 A 定尺极片宽	0.5 mm
传感器 A 定尺极片间距	0.5 mm
传感器 B 整周对极数	14
传感器 B 定尺极片长	11 mm
传感器 B 定尺极片宽	0.54 mm
传感器 B 定尺极片间距	0.54 mm
动尺极片正弦形幅值	5 mm
感应极片与激励极片间隙	0.5 mm
电极厚度	0.1 mm
激励电压幅值	11 V
激励电压频率	20 kHz
油污相对介电常数	2.1
极片材料	copper
求解域材料	air
油污材料	engine oil

模拟动尺与定尺之间相互移动 1 个周期,设定仿真周期为 4 mm,步长为 0.2 mm,共计 21 个点。

3.1 均匀油污仿真

在整个定尺极片上均匀覆盖一层油污,模拟油污在定尺极片上形成均匀油膜并与动尺相互移动 1 个周期。对比无污染和均匀污染两种情况,并根据仿真结果得到

如图 13 的误差曲线和频谱图。

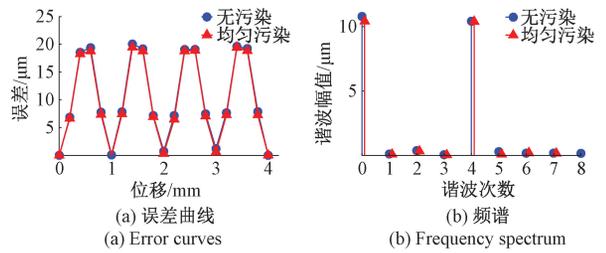


图 13 均匀污染仿真误差频谱图

Fig. 13 Uniform pollution simulation error spectrum

由图 13 可知,均匀油污污染和无污染误差规律和大小一致,没有引入误差,对传感器没有影响。

3.2 非均匀油污仿真

1) 不同长度油污污染

对非均匀油污污染中不同油污长度的情况进行仿真,依据污染长度设置覆盖 S_+ 、 C_+ 、 S_- 、 C_- 4 种油污污染情况进行仿真分析。仿真结果如图 14 所示。

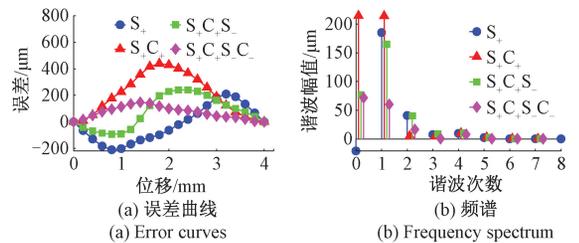


图 14 不同油污长度仿真结果

Fig. 14 Simulation results of different oil pollution lengths

由图 14 可知,非均匀油污污染中油污长度的增加会导致感应幅值发生不规律变化,主要引入一次误差。

2) 不同宽度油污污染

对不同宽度油污污染进行仿真,宽度 l 设定为 4 mm、6 mm、8 mm 3 种情况进行仿真,仿真结果如图 15 所示。

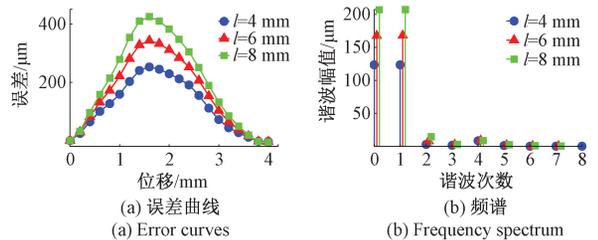


图 15 不同油污宽度仿真结果

Fig. 15 Simulation results of different oil pollution width

由图 15 可知,非均匀油污污染情况下,随着油污污染宽度的增加,一次误差同样呈现规律性的增加。

3) 不同厚度油污污染

同理对不同油污污染厚度 h 进行仿真,将油污厚度设置为 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm 3 种进行仿真分析,仿真结果如图 16 所示。

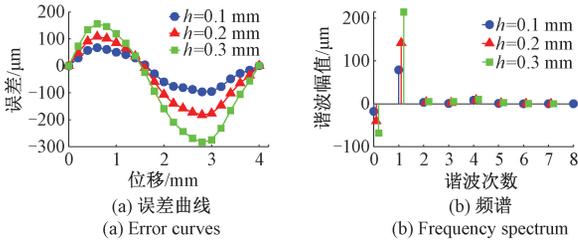


图 16 不同油污厚度仿真结果

Fig. 16 Simulation results of different oil pollution thickness

由图 16 可知,非均匀油污污染情况下,随着油污污染厚度的增加,一次误差同样增加。

4 平台搭建以及油污污染实验结果

4.1 实验平台搭建

为了验证理论以及仿真结果的正确性,搭建了如图 17 所示的实验平台。

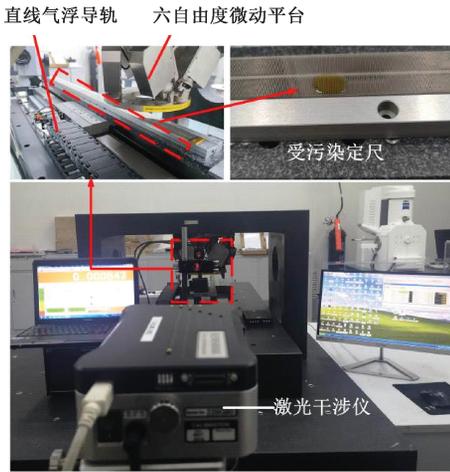


图 17 实验平台

Fig. 17 Experimental platform

实验平台包括以下组件:采用美国 AEROTECH 公司的 ABL2000 直线气浮平台(其定位精度达到 ± 1.5 ppm), Physik Instrumente H-824 六自由度微动平台(重复定位精度达到 ± 0.1 μm)上。NI 公司的 LABVIEW 信号发生器,雷尼绍 XL80 激光干涉仪(线性测量精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ m),250-249 对极数的绝对式纳米时栅传感器(精测部分:定尺 1 m 包含 250 个周期,粗测部分:1 m 包含 249 个周期)。传感器定尺安装在直线气浮平台上,控制

定尺来回移动,通过信号发生器将 4 路幅值相等、相位相差 90° 的激励施加在定尺上,动尺部分安装在六自由度微动平台上。使用激光干涉仪作为测量基准,将其测量得到的位移数据与时栅传感器测量得到的位移数据进行对比,以获取误差数据。

4.2 油污污染实验结果

1) 均匀油污污染

选择高速机床常用润滑油 ISO VG22 作为污染源对传感器进行对极内精度测试实验,将安装间隙调整为 0.5 mm,以步长 0.2 mm 进行静态采集,4 mm 一个周期共采集了 21 个数据点。测量无污染、均匀油污污染情况下传感器的误差数据,实验结果如图 18 所示。

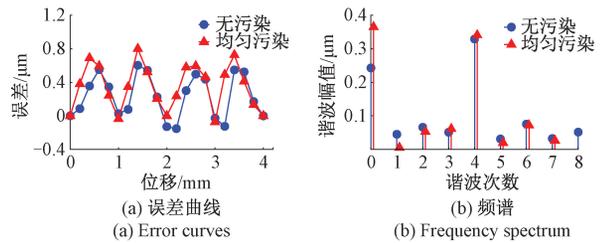


图 18 均匀污染实验结果

Fig. 18 Results of uniform pollution experiment

根据误差曲线可以得出:在无污染和均匀油污污染情况下,传感器的误差规律和大小基本一致。证明均匀油污污染对传感器没有影响,与理论和仿真模型的结果一致。

2) 不同长度油污污染

在非均匀油污污染的情况下,随机设置不同长度的油污进行测试,实验结果如图 19 所示。

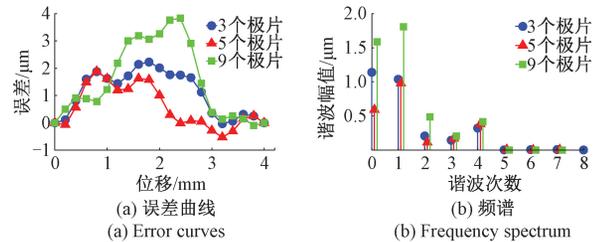


图 19 不同油污长度实验结果

Fig. 19 Experimental results of different oil stain lengths

由实验结果可以得出:在非均匀油污污染情况下,油污污染长度主要引入周期内一次误差,这一结果与理论分析和仿真结果一致。

3) 不同宽度油污污染

在非均匀油污污染的情况下,设置窄、中、宽 3 种不同宽度的油污进行测试,实验结果如图 20 所示。

由实验结果可以得出:在非均匀油污污染情况下,油污污染宽度越大导致引入的一次谐波误差增加,这一结

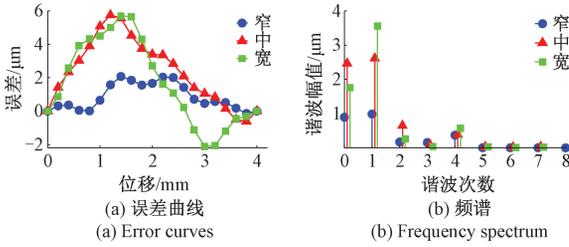


图 20 不同油污宽度实验结果

Fig. 20 Experimental results of different oil widths

果与理论分析和仿真结果一致。

4) 不同厚度油污污染

在非均匀油污污染的情况下,对3种不同厚度油污污染进行测试,实验结果如图21所示。

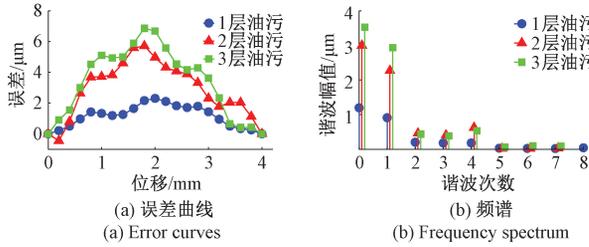


图 21 不同油污厚度实验结果

Fig. 21 Experimental results of different oil thickness

由实验结果可以得出:在非均匀油污污染情况下,油污污染厚度越大对传感器精度影响更大,这一结果与理论分析和仿真结果保持一致。

5 油污污染优化及验证

5.1 油污污染优化

本文提出一种差动的结构,在绝对式纳米时栅传感器的基础上增加一块大小相同的动尺极片形成双测头,利用差动结构来抑制共模干扰。在这种结构中,两块动尺极片的感应信号相位相差 180°,通过差动可以有效抑制油污污染引入的一次误差,从而提高传感器的测量精度。其结构如图 22 所示。

以传感器 A 为例,两个测头独立存在互不影响,根据式(2)动尺极片 A-1 上的感应信号可以表示为:

$$U_{a1} = \left[(A_1 - A_3) + (A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1} \right] \sin(\omega t) + \left[(A_2 - A_4) + (A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1} \right] \cos(\omega t) \quad (10)$$

由于动尺极片 A-1 和动尺极片 A-2 在相位上相差 180°,传感器动尺极片 A-2 的感应信号可以表示为:

$$U_{a2} = \left[(A_1 - A_3) - (A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1} \right] \sin(\omega t) +$$

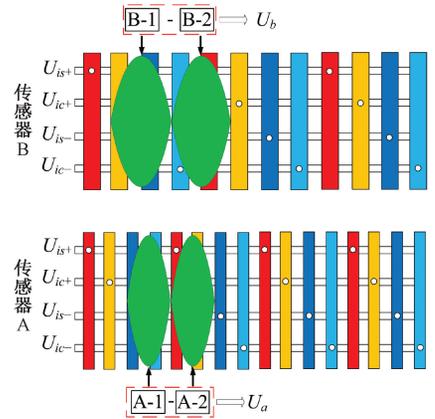


图 22 绝对式纳米时栅传感器差动结构

Fig. 22 Differential structure of absolute time-grating

$$\left[(A_2 - A_4) - (A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1} \right] \cos(\omega t) \quad (11)$$

由于在相位上两块动尺极片相差 180°,利用差动的结构作差后得:

$$U_{a1} - U_{a2} = 2(A_1 + A_3) \sin(\omega t) \cos \frac{\pi x}{W_1} + 2(A_2 + A_4) \cos(\omega t) \sin \frac{\pi x}{W_1} = \sqrt{\left[2(A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1} \right]^2 + \left[2(A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1} \right]^2} \sin \left(\omega t + \arctan \frac{(A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1}}{(A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1}} \right) \quad (12)$$

则误差可以表示为:

$$e(x) = x' - x = \frac{W_1}{\pi} \left[\arctan \frac{(A_2 + A_4) \sin \frac{\pi x}{W_1}}{(A_1 + A_3) \cos \frac{\pi x}{W_1}} - \arctan \frac{\sin \frac{\pi x}{W_1}}{\cos \frac{\pi x}{W_1}} \right] \quad (13)$$

取 $A_1 = 1.1, A_2 = 1.18, A_3 = 1.31, A_4 = 1.15$,单路和差动结构对比的误差曲线和频谱图如图 23 所示。

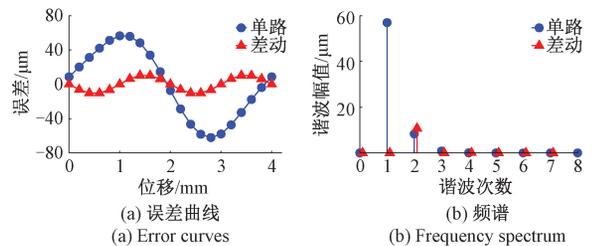


图 23 差动结构的误差曲线及频谱

Fig. 23 Error curve and spectrum of differential structure

由图 23 可以得出,由油污污染造成的一次谐波误差得到了有效抑制。这验证了差动结构可以有效抑制传感器中的一次谐波误差,降低了油污污染的影响,提高了传感器的抗污染能力。

5.2 差动结构实验验证

动尺采用差动结构对非均匀油污污染进行实验验证,对比实验结果如图 24 所示。

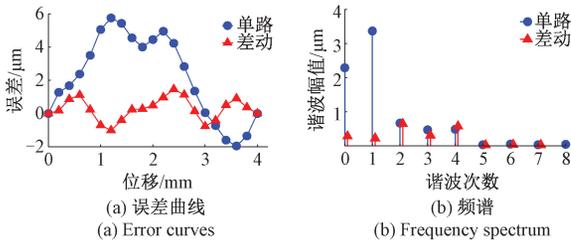


图 24 实验验证结果

Fig. 24 Experimental verification result

根据实验结果可以得出,差动结构有效抑制了一次谐波误差。进一步验证了差动结构在消除共模干扰和提高传感器精度方面的有效性。通过差动测量的方法,传感器在非均匀油污污染下仍能保持较低的误差水平,提高了传感器的可靠性和准确性。

6 结 论

本文以绝对式纳米时栅位移传感器为研究对象研究了栅尺油污污染对传感器的误差影响。首先介绍了传感器的结构和测量原理,分析了栅尺油污污染的误差机理,再通过仿真分析和实验测试对油污污染误差机理进行验证,并提出了差动结构有效抑制了油污污染引入的一次谐波误差。理论与实验研究表明:1) 均匀油污污染对传感器没有影响;2) 不同长度油污污染主要引入一次谐波误差;3) 一次误差随着油污污染宽度的增加而增加;4) 一次误差随着油污污染厚度增加而增加。本文研究了绝对式位移传感器污染误差机理,对提高传感器可靠性与环境适应性具有重要实践指导意义,同时也为同类传感器栅尺污染研究提供参考。下一步将开展不同形态和不同介质等复合油污污染情况的误差特性研究。

参考文献

[1] 吕盾,张佳辉,王大伟,等. 国产数控机床动态精度技术现状与对策[J]. 航空制造技术, 2022, 65(6): 22-33.
LYU D, ZHANG J H, WANG D W, et al. Current situation and countermeasures of dynamic precision technology of domestic CNC machine tool [J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(6): 22-33.
[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 is the cornerstone of supporting the development of lithography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 1-7.
[3] KUMAR A S A, GEORGE B, MUKHOPADHYAY S C. Technologies and applications of angle sensors: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7195-7206.
[4] 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. Review of grating precision displacement measurement technology [J]. Chinese Optics, 2019, 12(4): 741-752.
[5] 梁应选,王楠,张昌明. 基于光栅传感器位移测量系统设计[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(1): 85-88.
LIANG Y X, WANG N, ZHANG CH M. Design of displacement measurement system based on grating sensor[J]. Mechanical Research and Application, 2022, 35(1): 85-88.
[6] 魏正杰,张迪,吴冠豪. 用于精密位移测量的微型光栅传感器开发[J]. 光子学报, 2021, 50(9): 9-19.
WEI ZH J, ZHANG D, W G H. Development of micro grating sensor for precision displacement measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9): 9-19.
[7] 徐全坤,阚侃,黄振宇,等. 光栅尺动态误差检测与补偿技术研究[J]. 装备制造技术, 2023(1): 50-53.
XU Q K, KAN K, HUANG ZH Y, et al. Research on dynamic error detection and compensation technology of grating ruler[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(1): 50-53.
[8] PAUL S, CHANG J. Design and development of a novel high resolution absolute rotary encoder system based on affine n-digit N-ary gray code[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2018, 13(2): 943-52.
[9] 韩叔桓,杨延西,张新雨,等. 互补格雷码双 N 步相移的彩色编码光栅投影轮廓术[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 42-49.
HAN SH H, YANG Y X, ZHANG X Y, et al. Color coded grating projection profilometry with complementary gray code double N-step phase shift[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 42-49.
[10] FU SH W, CHENG F, TIAHJOWIDODO T, et al. Development of an image grating sensor for position measurement[J]. Sensors, 2019, 19(22): 4986.
[11] 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. Research progress on coding theory of absolute photoelectric encoder [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 41(1): 1-12, 197.
- [12] CHENG F, ZHOU D F, YU Q, et al. A new image grating sensor for linear displacement measurement and its error analysis[J]. Sensors, 2022, 22(12): 4361.
- [13] 于海, 万秋华, 赵长海, 等. 图像式光电编码器高分辨力细分算法及误差分析[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 205-214.
- YU H, WAN Q H, ZHAO CH H, et al. High resolution subdivision algorithm and error analysis of image photoelectric encoder [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 205-214.
- [14] ZHAO CH H, WAN Q H, LIANG L H. Compensation for dynamic subdivision error when the grating displacement sensor code disk is stained [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(3): 2403-2410.
- [15] YU H, WAN Q H, ZHAO CH H. Stain-detection and anti-stain algorithms based on dual detector data interchange in image-type displacement measurement technology [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72, 5012209.
- [16] YUAN P F, HUANG D Q, LEI ZH K, et al. An anti-spot, high-precision subdivision algorithm for linear CCD based single-track absolute encoder [J]. Measurement, 2019, 137: 143-154.
- [17] 陈文艺, 杨勇, 杨辉. 基于图像的绝对位置编码器编解码算法研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(3): 631-635.
- CHEN W Y, YANG Y, YANG H. Research on encoding and decoding algorithm of image-based absolute position encoder[J]. Computer and Digital Engineering, 2022, 50(3): 631-635.
- [18] YU H, WAN Q H, LU X R, et al. A robust sub-pixel subdivision algorithm for image-type angular displacement measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 100: 234-238.
- [19] 刘小康, 蒲红吉, 郑方燕, 等. 纳米时栅位移传感器电场分布与误差特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2257-2264.
- LIU X K, PU H J, ZHENG F Y, et al. Research on electric field distribution and error characteristics of time-grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2257-2264.
- [20] 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.
- [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.

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 received 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 smart sensor.



余志立, 2018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: 841767883@qq.com

Yu Zhili received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2018. He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interests include sensor technology and intelligent instrument.



郑方燕(通信作者), 2008年于重庆理工大学获得硕士学位, 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: zfy@cqut.edu.cn

Zheng Fangyan (Corresponding author) received her M. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2008. She is currently an associate professor at Chongqing University of Technology. Her main research interests include precision measurement technology and smart sensor.