

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615198

纳米时栅位移传感器栅尺损伤误差特性分析*

蒲红吉, 林 栋, 刘小康, 陈自然, 彭 凯

(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:针对纳米时栅位移传感器在复杂工业现场长期运行过程中因栅尺损伤所导致的传感器可靠性下降问题,开展了栅尺损伤误差特性研究。传感器栅尺由矩形电极阵列构成,相邻四路电极为一个周期;栅尺上方为双正弦形感应电极,用于拾取感应信号。当栅尺出现损伤时输出信号会受到影响,进而引入测量误差。为了研究传感器栅尺损伤误差特性,将栅尺损伤分为了栅尺电极断裂损伤和划痕损伤两类。首先,采用分段面积积分方法建立了栅尺电极无损伤状态下的理论传感模型。在此基础上,建立了栅尺电极断裂损伤的分段面积积分数学模型和划痕损伤的电场仿真模型,分别分析了栅尺电极断裂损伤和划痕损伤误差特性。理论分析表明:单路栅尺电极纵向断裂损伤会导致该路输出信号幅值减小,主要引入周期内一次谐波误差,并且误差随着电极断裂高度的增加而增加;当多路栅尺电极横向断裂时,会导致多路输出信号幅值不等,周期内主要表现为一次谐波误差;栅尺电极存在划痕损伤时对传感器测量精度影响不明显。最后,采用印刷电路板(PCB)工艺制作了传感器样机,搭建了实验平台,实验结果验证了理论分析的正确性。研究为后续提高传感器的长期性能可靠性和环境适应性提供了理论基础。

关键词: 时栅位移传感器;栅尺损伤;可靠性;误差特性分析

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 error characteristics induced by grid scale damage in nanometer time-grating displacement sensors

Pu Hongji, Lin Dong, Liu Xiaokang, Chen Ziran, Peng Kai

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

Abstract: To address the issue of reduced sensor reliability caused by grid scale damage during long-term operation of nanometer time-grating displacement sensors in complex industrial environments, a study on the error characteristics of grid scale damage was conducted. The sensor's grid scale is composed of a rectangular electrode array, with four adjacent electrodes forming one period. Above the grid scale is a dual-sinusoidal inductive electrode, used to capture induced signals. When the grid scale is damaged, the output signal is affected, thereby introducing measurement errors. To investigate the error characteristics of grid scale damage in the sensor, the grid scale damage was classified into two categories: Electrode fracture damage and scratch damage. First, a theoretical sensing model for the grid scale electrodes in their undamaged state was established using the piecewise area integration method. Based on this, a piecewise area integration mathematical model for fracture damage of grid scale electrodes and an electric field simulation model for scratch damage were established. These models were used to analyze the error characteristics associated with both types of damage. Theoretical analysis reveals that longitudinal fracture damage in a single grid scale electrode leads to a reduction in signal amplitude for that channel, primarily introducing a first harmonic error within the measurement cycle. This error increases with the height of the electrode fracture. When transverse fracture damage occurs across multiple electrodes, unequal signal amplitudes are observed among multiple channels, with the dominant error within the cycle again being the first harmonic error. However, scratch damage on the grid scale electrode shows

收稿日期: 2026-04-27

Received Date: 2026-04-27

* 基金项目: 国家自然科学基金(52522512, 52125503)、重庆理工大学科研创新团队(2023TDZ008)、重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-LZX0088)项目资助

no significant impact on the sensor's measurement accuracy. Finally, a sensor prototype was fabricated using the printed circuit board (PCB) manufacturing process, and an experimental platform was constructed. The experimental results confirmed the accuracy of the theoretical analysis. This research provides a theoretical foundation for improving the long-term performance reliability and environmental adaptability of nanometer time-grating displacement sensors.

Keywords: time-grating displacement sensors; grid scale damage; reliability; error characteristics analysis

0 引言

精密位移测量是现代工业、科学研究和工程领域的一项关键技术,其水平直接决定了高端装备制造能力与精密仪器性能。位移传感器作为实现精密测量的核心单元,广泛应用于高档数控机床、半导体制造和航空航天等领域,其长期可靠性作为关键性能指标,直接决定了设备的整体健康状态与稳定运行^[1-2]。如今应用最为广泛的位移传感器主要是栅式位移传感器,这类传感器以栅尺作为核心基准部件,因此其栅尺性能直接影响着传感器测量精度和长期可靠性。目前,光栅位移传感器因高精度、高分辨率等优势而备受关注,现已成为栅式位移传感器的主要代表^[3-5]。

高精度光栅位移传感器以精密的周期性栅线为测量基准,通过检测衍射光干涉信号的相位变化实现位移测量^[6-7]。光栅尺的制造工艺复杂,尤其是高密度栅线的精密刻划难度较大^[8-9]。制造过程中,栅线刻划精度、栅距均匀性、刻线形态以及表面粗糙度等因素会直接影响光栅衍射特性^[10-12]。光栅衍射效率和波前质量是决定干涉条纹信号质量和测量精度的关键因素^[13-14]。Ban等^[15]通过仿真和实验证实,光栅的脊面粗糙度对衍射效率有抑制作用,导致信号的强度和质量降低;Wu等^[16]指出,高深宽比透射光栅侧壁粗糙度超过3 nm时,衍射效率明显下降。此外,侧壁不对称结构会导致衍射信号不对称,从而引入叠加测量误差^[17-19];栅线非等距和非平行槽会引起衍射波前像差,造成干涉条纹局部扭曲、对比度降低和位置偏移,产生非线性误差^[20-21]。由此可见,光栅微观形貌是影响传感器测量精度和可靠性的核心因素之一,其结构特性决定了对任何形式的损伤都高度敏感^[22]。在复杂工作环境中,各种外部因素常导致栅尺出现的划痕、裂纹和变形等损伤,使得光栅性能下降,从而进一步放大微观缺陷对测量精度的影响。尤其是传感器在工业现场长期运行时,损伤的不断累积会加剧栅尺性能退化,进而降低传感器测量精度和长期可靠性。

作者所在研究团队提出了一种新型位移传感器——纳米时栅位移传感器^[23]。该传感器利用矩形电极阵列结构构建匀速交变电场,将空间位移变化量转化为时间变化量,借助时间量的精度优势实现高精度位移测量,摆脱了对超精密制造的依赖。纳米时栅传感器的栅尺性能

同样是影响测量精度和可靠性的关键因素,在实际工业应用中,栅尺电极易因磨损、腐蚀等外部因素而造成损伤,导致传感器测量精度和长期性能可靠性下降。本文运用分段面积积分方法建立了栅尺电极断裂损伤的数学模型,并在有限元分析软件中搭建了电场仿真模型,分别分析了栅尺电极不同损伤状态下的传感器误差特性。结果表明,单路栅尺电极纵向断裂主要引入一次谐波误差,且误差随着断裂长度的增加而增加;多路栅尺电极横向断裂时,主要表现为一次谐波误差;栅尺电极出现轻微划痕时对传感器测量精度影响不明显。本文对纳米时栅传感器栅尺损伤误差特性进行研究,为后续提高传感器长期性能可靠性和环境适应性提供了理论基础。

1 传感器测量原理

纳米时栅位移传感器由栅尺和动尺组成。如图1(a)所示的结构为双列式传感结构,其栅尺由两排空间正交的矩形电极组成,将四路栅尺电极依次定义为S+、C+、S-和C-电极,且S+和S-电极组成S路,C+和C-电极组成C路;栅尺上方的动尺为两个双正弦形感应电极,通过电场耦合可获取两路驻波信号 U_{OS} 和 U_{OC} ,二者叠加后可得到行波信号。然而,通过两路驻波信号合成行波信号的过程容易受到安装偏差、信号串扰等因素的影响,从而降低传感器测量精度。因此,团队前期在双列式结构的基础上提出了单列式传感结构^[24],演变过程如图1所示。首先,在保证双列式结构半个周期宽度 W_d 不变的同时增大相邻栅尺电极之间的间距 l_e ,此时感应电极与栅尺电极之间的重叠面积仍会保持正弦变化规律,由此得到了如图1(b)所示的结构;其次,将其中一列激励电极插入到另一列的间隔中,同时保留一个双正弦形感应电极,如此便构成了如图1(c)所示的单列式传感结构。

单列式传感器的栅尺由一排矩形电极组成,其中相邻S+、C+、S-、C-四路电极为一个周期,周期宽度为 W ,相邻电极之间的间距为 l 。双正弦形感应电极的宽度与半个周期宽度 W_d 相同,其正弦形幅值为 H ,且始终与栅尺电极保持平行并留有安装间隙。传感器工作时,在四路栅尺电极上分别施加幅值为 A 、角频率为 ω 、相位依次相差 $\pi/2$ 的正弦激励信号,即 $U_{S+} = A \sin \omega t$, $U_{C+} = A \cos \omega t$, $U_{S-} = -A \sin \omega t$ 和 $U_{C-} = -A \cos \omega t$,感应电极通过电场耦合可直接获得行波信号 U_0 。当感应电极在栅尺电极上方沿

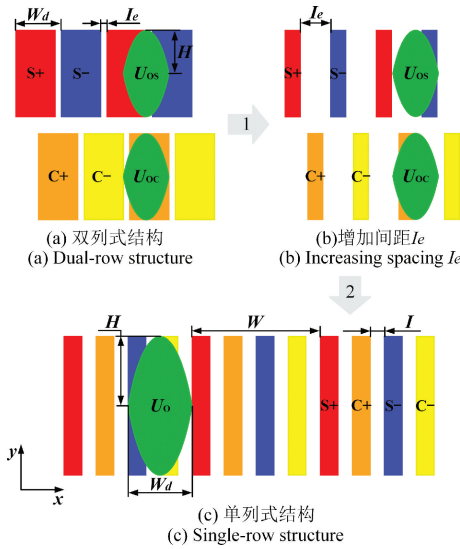


图1 单列式纳米时栅传感器演变过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the the evolution process of single-row nanometer time-grating sensors

x 轴方向移动时, 感应电极与栅尺电极形成耦合电容。对于理想耦合电容, 当安装间隙和介电系数保持不变时, 输出信号是感应电极与栅尺电极之间有效重叠面积变化量的线性响应, 因此输出信号可表示为^[25]:

$$U_0 = \frac{K(\Delta S_{S+} U_{S+} + \Delta S_{S-} U_{S-} + \Delta S_{C+} U_{C+} + \Delta S_{C-} U_{C-})}{2S_0} \quad (1)$$

式中: K 为电场耦合系数; ΔS_{S+} 、 ΔS_{C+} 、 ΔS_{S-} 和 ΔS_{C-} 分别为感应电极与四路栅尺电极之间的有效重叠面积变化量; S_0 表示最大重叠面积。

根据如图1所示的演变过程可知, 双列式结构和单列式结构的测量模型是等效的, 因此本文采用如图1(a)所示双列式结构构建传感器理论模型进行分析。以S路为例, 同时忽略电极间距 I_e 的影响 ($I_e = 0$), 令感应电极以 $x = -W_d$ 为起点, 相对于栅尺电极沿 x 轴正方向移动一个周期, 可建立如图2所示的S路面积变化过程, 其中栅尺电极高度为 $2H$ 。在此期间, S+路有效重叠面积变化量 ΔS_{S+} 经历了从0逐渐增加至最大值、再由最大值逐渐减小为0的两个阶段。

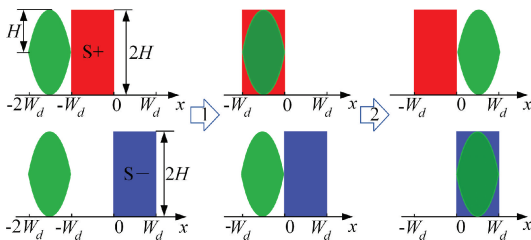


图2 S路有效重叠面积变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the effective overlapping area variation in the S path

将感应电极与S+电极之间的有效重叠面积变化量所经历的两个阶段等效为分段面积分进行计算, 可求得 ΔS_{S+} 的表达式:

$$\Delta S_{S+}(x) = \begin{cases} \int_{-W_d}^x \left[\left(H - H \sin \frac{\pi x}{W_d} \right) - \left(H + H \sin \frac{\pi x}{W_d} \right) \right] dx = \\ \frac{2HW_d}{\pi} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{W_d} \right), -W_d < x < 0 \\ \int_{x-W_d}^0 \left[\left(H - H \sin \frac{\pi x}{W_d} \right) - \left(H + H \sin \frac{\pi x}{W_d} \right) \right] dx = \\ \frac{2HW_d}{\pi} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{W_d} \right), 0 \leq x < W_d \end{cases} \Rightarrow \Delta S_{S+}(x) = \frac{2HW_d}{\pi} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{W_d} \right), -W_d \leq x < W_d \quad (2)$$

当如图2所示的感应电极以位移 $x=0$ 为起点相对于S-电极移动一个周期时, 可采用同样的分段面积积分方法求得 ΔS_{S-} 。同理可建立C路的面积变化过程, 并求得C+和C-路的有效重叠面积变化量 ΔS_{C+} 和 ΔS_{C-} 。将四路激励信号和重叠面积变化量的表达式代入式(1)中可求得最终的输出信号:

$$U_0 = \frac{KA \sin \omega t}{2S_0} (\Delta S_{S+} - \Delta S_{S-}) + \frac{KA \cos \omega t}{2S_0} (\Delta S_{C+} - \Delta S_{C-}) = KA \sin \left(\omega t + \arctan \frac{\Delta S_{C+} - \Delta S_{C-}}{\Delta S_{S+} - \Delta S_{S-}} \right) = A_F \sin \left(\omega t + \frac{\pi x}{W_d} \right) \quad (3)$$

式中: A_F 表示输出信号幅值。 U_0 的相位变化与相对位移 x 的变化成正比, 运用高频脉冲插补方法获得行波信号相位差后即可求得相对位移值。

2 栅尺损伤误差特性分析

纳米时栅位移传感器的栅尺由线性排列的矩形电极阵列组成, 当传感器在复杂工业现场长期运行时, 固体粉尘、酸性液体等杂质可能进入传感器内部, 导致栅尺出现不同程度的损伤, 从而影响测量精度和可靠性。本文将栅尺损伤分为栅尺电极断裂损伤与划痕损伤两种类型, 并通过建立栅尺损伤误差理论模型, 分别分析了这两类栅尺损伤时的误差特性。

2.1 栅尺电极断裂损伤误差特性分析

栅尺电极断裂损伤主要包括两种情况: 单路栅尺电极纵向断裂和多路栅尺电极横向断裂。当栅尺电极断裂时, 感应电极与栅尺电极之间的有效重叠变化量将发生改变, 因此, 采用上述分段面积积分方法构建了误差理论模型进行误差特性分析。

1) 单路栅尺电极纵向断裂损伤

以 S+ 电极纵向断裂为例。由于此时其余三路栅尺电极无损伤, 其有效重叠面积变化表达式保持不变, 因此仅需对感应电极与断裂 S+ 电极之间的有效重叠面积变化进行单独建模。如图 3 所示, h 为栅尺电极断裂高度, l_1 和 l_2 表示中间位移量; 栅尺电极灰色区域表示无激励部分, 属于无效面积; 根据断裂高度 h 的不同, 断裂程度可分为两种情形: $0 \leq h < H$ 和 $H \leq h < 2H$ 。当 S+ 电极断裂高度不同时, 重叠面积变化规律也不相同, 因此需要分别进行建模分析。

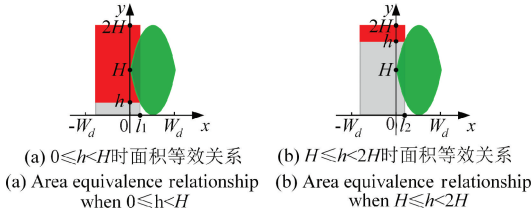


图 3 S+ 电极断裂时重叠面积等效关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of equivalent effective overlapping area relationship during S+ electrode fracture

首先分析 $0 \leq h < H$ 的情况。根据如图 3(a) 所示的重叠面积等效关系, 可推导出 l_1 与 h 的关系为:

$$H - H \sin \frac{\pi l_1}{W_d} = h \Rightarrow l_1 = \frac{W_d}{\pi} \arcsin \left(1 - \frac{h}{H} \right) \quad (4)$$

S+ 电极纵向断裂时, 令感应电极以 $x = -W_d$ 为起点, 相对于断裂 S+ 电极沿 x 轴正方向移动一个周期, 如图 4 所示。在此期间, 感应电极与断裂 S+ 电极之间的有效重叠面积变化量的积分函数随着位移的变化而变化, 因此重叠面积变化共分为如图 4 所示的 6 个阶段。将各个阶段的重叠面积变化等效为面积积分进行计算, 可知当 S+ 电极出现 $0 \leq h < H$ 程度的纵向断裂损伤时, ΔS_{s+} 可表示为如下分段函数:

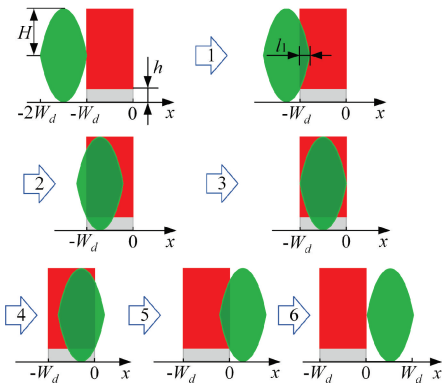


图 4 $0 \leq h < H$ 时有效重叠面积变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the effective overlapping area variation when $0 \leq h < H$

$$\Delta S_{s+}(x) =$$

$$\begin{cases} \frac{2HW_d}{\pi} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{W_d} \right), & -W_d \leq x < -W_d + l_1 \\ \frac{HW_d}{\pi} \left(\cos \frac{\pi x}{W_d} - \cos \frac{\pi l_1}{W_d} + 2 \right) + (H-h)(x - l_1 + W_d), & -W_d + l_1 \leq x < -l_1 \\ \frac{2HW_d}{\pi} \left(\cos \frac{\pi x}{W_d} - \cos \frac{\pi l_1}{W_d} + 1 \right) + (H-h)(W_d - 2l_1), & -l_1 \leq x < l_1 \\ \frac{HW_d}{\pi} \left(\cos \frac{\pi x}{W_d} - \cos \frac{\pi l_1}{W_d} + 2 \right) + (H-h)(W_d - l_1 - x), & l_1 \leq x < W_d - l_1 \\ \frac{2HW_d}{\pi} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{W_d} \right), & W_d - l_1 \leq x < W_d \end{cases} \quad (5)$$

其次, 分析 $H \leq h < 2H$ 的情况。 l_2 与 h 的关系可根据如图 3(b) 所示的重叠面积等效关系求得:

$$H + H \sin \frac{\pi l_2}{W_d} = h \Rightarrow l_2 = \frac{W_d}{\pi} \arcsin \left(\frac{h}{H} - 1 \right) \quad (6)$$

同理可建立此类断裂损伤程度的 S+ 路有效重叠面积变化过程, 如图 5 所示。

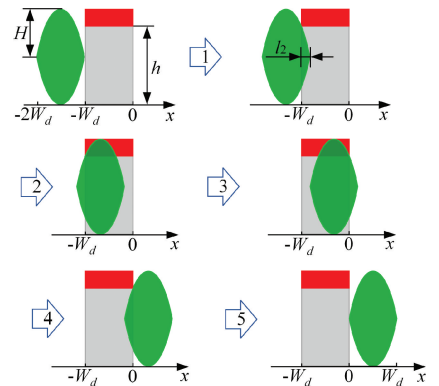


图 5 $H \leq h < 2H$ 时有效重叠面积变化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the effective overlapping area variation when $H \leq h < 2H$

其中, 感应电极同样以 $x = -W_d$ 为起点, 相对于断裂 S+ 电极移动一个周期。这期间内, 感应电极与该断裂 S+ 电极之间的有效重叠面积变化量共经历了如图 5 所示的 5 个阶段, 同理采用上述分段面积积分方法可求得 $H \leq h < 2H$ 时的 ΔS_{s+} 分段函数:

$$\Delta S_{S+}(x) = \begin{cases} 0, & -W_d \leq x < -W_d + l_2 \\ \frac{HW_d}{\pi} \left(\cos \frac{\pi x}{W_d} + \cos \frac{\pi l_2}{W_d} \right) + (H-h)(x-l_2+W_d), & -W_d + l_2 \leq x < -l_2 \\ \frac{2HW_d}{\pi} \cos \frac{\pi l_2}{W_d} + (H-h)(W_d-2l_2), & -l_2 \leq x < l_2 \\ \frac{HW_d}{\pi} \left(\cos \frac{\pi x}{W_d} + \cos \frac{\pi l_2}{W_d} \right) + (H-h)(W_d-l_2-x), & l_2 \leq x < W_d - l_2 \\ 0, & W_d - l_2 \leq x < W_d \end{cases} \quad (7)$$

通过对比 S+ 电极无损伤状态下与断裂损伤状态下的有效重叠面积变化量,可知单路栅尺电极断裂损伤会使得该路有效重叠面积减小,从而导致该路输出信号幅值减小,最终影响传感器测量精度。

由输出信号式(3)可知,测量误差可表示为:

$$e(x) = \frac{W_d}{\pi} \left[\arctan \frac{\Delta S_c}{\Delta S_s} - \arctan \left(\tan \frac{\pi x}{W_d} \right) \right] \quad (8)$$

式中: $\Delta S_s = \Delta S_{S+} - \Delta S_{S-}$, 表示由 S+ 路和 S- 路重叠面积变化合成的 S 路面积变化; $\Delta S_c = \Delta S_{C+} - \Delta S_{C-}$, 表示由 C+ 路和 C- 路合成的 C 路面积变化。

当 S+ 电极出现断裂损伤时, ΔS_{S+} 为分段函数,使得 ΔS_s 也成为分段函数,而 ΔS_c 仍为标准正弦函数。因此,此时误差表达式(8) 亦为分段函数,不同位移处的误差需根据对应断裂程度和位移区间的误差函数进行计算。以 $0 \leq h < H, x \in [-l_1, l_1]$ 时为例,根据重叠面积变化函数和误差表达式可知此时误差表示为:

$$e(x) = \frac{W_d}{\pi} \left[\arctan \frac{\frac{4HW_d}{\pi} \sin \frac{\pi x}{W_d}}{\frac{2HW_d}{\pi} \left(2 \cos \frac{\pi x}{W_d} - \cos \frac{\pi l_1}{W_d} \right) + (H-h)(W_d-2l_1)} - \arctan \left(\tan \frac{\pi x}{W_d} \right) \right] \quad (9)$$

同理,可求得其余位移区间的误差函数,代入数值即可获得周期内测量误差。为研究不同程度断裂损伤对误差的影响,根据上述 S+ 电极断裂高度区间取 h 分别为 $0.7H$ 、 H 和 $1.3H$ 这三种情况进行分析。令 $H=5\text{ mm}$, $W_d=2\text{ mm}$, 则感应电极以位移 $x=-2\text{ mm}$ 为起点、 0.2 mm 为步长移动一个周期 4 mm , 根据误差理论模型计算周期内测量误差,最终得到如图 6 所示的误差曲线及频谱图。

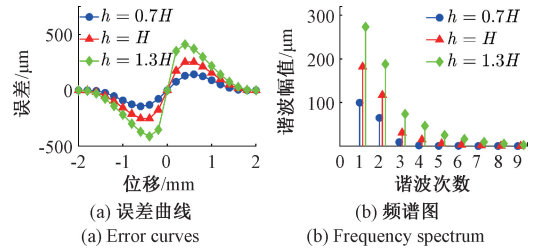


图 6 S+ 电极纵向断裂误差曲线及频谱图

Fig. 6 Error curves and frequency spectrum of S+ electrode longitudinal fracture

由图 6 可知, S+ 电极断裂高度 $h=0.7H$ 时, 主要引入周期内一次谐波误差; 当断裂高度 h 增加至 H 和 $1.3H$ 时, 一次谐波误差幅值呈递增趋势。这一结果表明, S+ 电极断裂时主要引入周期内一次谐波误差, 且误差随着电极断裂高度的增加而增加。

周期内四路栅尺电极在空间位置上沿 x 轴相差了 $W/4$, 那么四路有效重叠面积变化函数仅是在相位上依次相差了 $\pi/2$ 。因此, S+ 电极断裂时的误差特性可推广到其余三路电极断裂, 即 C+、S- 和 C- 电极中任意一路断裂时的误差特性与 S+ 电极断裂时相同。

2) 多路栅尺电极横向断裂损伤

纳米时栅传感器实际应用时, S+ 和 S- 路激励信号与 C+ 和 C- 路激励信号分别由栅尺上下两端施加, 因此 S 路和 C 路电极断裂高度的起点分别位于栅尺两端, 如图 7 所示。当周期内四路栅尺电极均断裂时, C+、S- 和 C- 路有效重叠面积变化量的分段函数同理可采用前文所述分段面积积分方法求得。

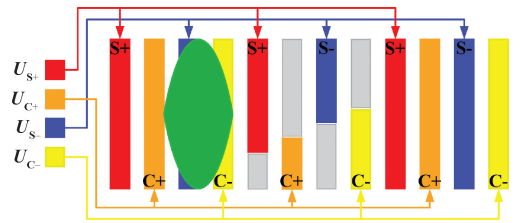


图 7 多路栅尺电极横向断裂示意图

Fig. 7 Schematic diagram of lateral fracture in multi-channel grid scale electrodes

对 S+, S+, C+, S+, C+, S-, 以及 S+, C+, S-, C- 电极断裂这 4 种情况进行误差特性分析。多路栅尺电极横向断裂时, 各路电极断裂损伤程度通常是非规律性的, 因此设定 S+, C+, S-, C- 电极的断裂高度 h 分别为 $0.6H$ 、 $1.1H$ 、 $1.2H$ 和 $0.5H$, 四路栅尺电极断裂高度各不相同, 将导致四路输出信号幅值不等。同理, 根据各路重叠面积分段函数和误差表达式可以计算出周期内测量误差。以 S+、C+ 电极断裂为例, 列出 $x \in [-l_1, l_1]$ 区间的误差函数:

$$e(x) = \frac{W_d}{\pi} \left[\arctan \frac{\frac{HW_d}{\pi} \left(3 \sin \frac{\pi x}{W_d} + \cos \frac{\pi l_2}{W_d} - 2 \right) - 0.1H \left(x - l_2 + \frac{W_d}{2} \right)}{\frac{2HW_d}{\pi} \left(2 \cos \frac{\pi x}{W_d} - \cos \frac{\pi l_1}{W_d} \right) + 0.4H(W_d - 2l_1)} + \arctan \left(\tan \frac{\pi x}{W_d} \right) \right] \quad (10)$$

同理,可求得其余位移区间以及各多路电极断裂情况的误差函数,通过理论计算可得到如图 8 所示的误差曲线及频谱图。

由图 8 可知,S+电极断裂,S+、C+电极断裂,S+、C+、S-电极断裂以及 S+、C+、S-、C-电极断裂时,周期内误差均主要表现为一次谐波误差。这一结果表明,多路栅尺电极出现断裂损伤时,主要引入周期内一次谐波误差。

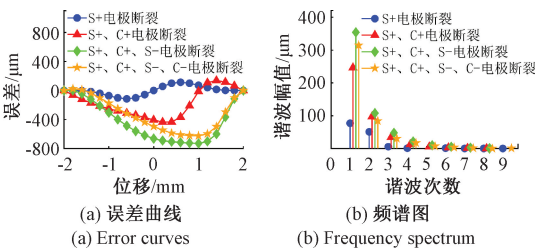


图 8 多路栅尺电极横向断裂误差曲线及频谱图

Fig. 8 Error curves and frequency spectrum of lateral fracture

2.2 栅尺电极划痕损伤误差特性分析

当传感器栅尺电极仅出现划痕损伤时,感应电极与栅尺电极之间的重叠面积变化规律并未改变,不适合采用面积积分方法进行分析。

因此,利用有限元分析软件搭建了单列式传感器的电场仿真模型,并以 S+电极出现划痕损伤为例进行误差特性分析,如图 9 所示,其中 δ 为划痕宽度。仿真模型四路栅尺电极依次通入 S+、C+、S-、C-四路激励信号,同时设置感应电极拾取耦合信号,并将网格设置为较细化的单元大小,仿真模型具体参数如表 1 所示。仿真模拟动尺在定尺上方移动一个周期 4 mm,步长为 0.2 mm,共得到 21 个点的数据,最终仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可知,传感器栅尺电极无损伤时主要表现为周期内四次谐波误差;S+电极出现划痕损伤时,周期内误差规律没有明显变化。结果表明,栅尺电极划痕损伤对传感器测量精度影响不明显。

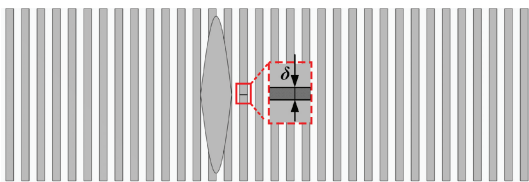


图 9 栅尺电极划痕损伤仿真模型

Fig. 9 Simulation model of scratch damage on electrode

表 1 传感器仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters of the sensor

参数名	参数值
栅尺周期数	15
栅尺电极高度	11 mm
栅尺电极宽度	0.5 mm
相邻栅尺电极间距	0.5 mm
感应电极正弦形幅值	5 mm
电极厚度	20 μm
划痕深度	2 μm
划痕宽度	20 μm
感应电极与栅尺电极间隙	0.6 mm
激励电压幅值	11 V
激励电压频率	20 kHz
电极材料	copper
求解域材料	air

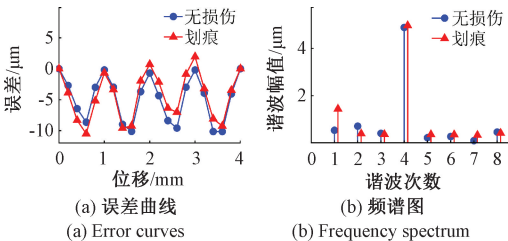


图 10 栅尺电极划痕损伤仿真结果

Fig. 10 Simulation results of scratch damage on electrodes

3 平台搭建及实验结果

3.1 实验平台搭建

为了验证理论分析结果的正确性,采用印刷电路板 (printed circuit board,PCB) 工艺制作了纳米时栅位移传感器样机,并在超精密实验室搭建了如图 11 所示的实验平台。将样机栅尺安装在 Aerotech ABL2000 直线气浮导轨上,该导轨在 1 200 mm 行程内测量精度可达 $\pm 0.5 \mu\text{m}$; 动尺安装在具备 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 重复定位精度的 Physik

Instrumente H-824 六自由度微动平台上,并调节动定尺之间的平行正对关系;时栅信号处理系统为栅尺施加四路激励信号并处理动尺的感应信号以得到位移值;Renishaw XL-80 激光干涉仪线性度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$,分辨率可达 1 nm ,以其测量值为基准可获得传感器测量误差。

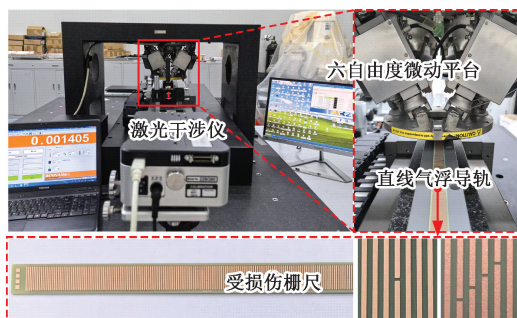


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

3.2 栅尺损伤实验结果

对传感器样机进行周期内精度测试。将安装间隙调整为 0.6 mm ,以移动步长 0.2 mm 控制直线气浮平台对传感器样机进行静态采样,一个周期为 4 mm ,共采集 21 个数据点。

1) 单路栅尺电极纵向断裂损伤

分别对栅尺 S+ 电极断裂高度 h 为 $0.7H$ 、 H 和 $1.3H$ 的情况进行测试,实验结果如图 12 所示。

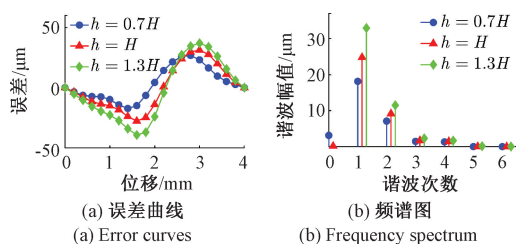


图 12 S+ 电极纵向断裂实验结果

Fig. 12 Experimental results of S+ electrode longitudinal fracture

由测试结果可知,单路栅尺电极出现断裂损伤时,主要引入周期内一次谐波误差,且断裂高度 h 越大,测量误差越大,与理论分析结果相符。

2) 多路栅尺电极横向断裂损伤

对周期内 S+, S+, C+, S+, C+, S-, 以及 S+, C+, S-, C- 电极断裂这 4 种断裂损伤情况进行测试,得到如图 13 所示的实验结果。

由测试结果可知,周期内多路栅尺电极出现断裂损伤时,主要表现为周期内一次谐波误差,与理论分析结果保持一致。

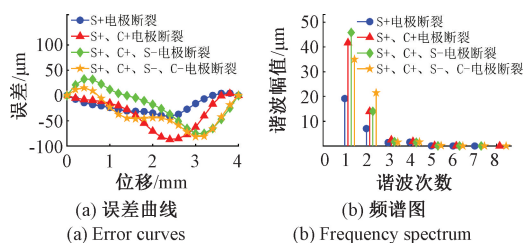


图 13 多路栅尺电极横向断裂实验结果

Fig. 13 Experimental results of lateral fracture in multi-channel scale electrodes

3) 栅尺电极划痕损伤

对 S+ 电极表面存在划痕损伤的情况进行测试,实验结果如图 14 所示。

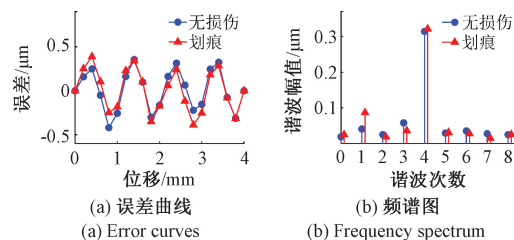


图 14 栅尺电极划痕损伤实验结果

Fig. 14 Experimental results of scratch damage on grid

由测试结果可知,栅尺电极无损伤时主要表现为周期内四次谐波误差;S+ 电极出现划痕损伤时,误差规律没有明显变化,这表明栅尺电极划痕损伤对测量精度影响不明显,与仿真分析结果一致。

4 结 论

本文以纳米时栅位移传感器为研究对象,采用分段面积积分方法建立了栅尺电极断裂损伤的数学模型,同时采用有限元分析软件搭建了栅尺电极划痕损伤的电场仿真模型,分别分析了栅尺电极断裂损伤和划痕损伤误差特性,并结合实验验证得出如下结论:1) 单路栅尺电极纵向断裂损伤主要引入周期内一次谐波误差,且误差随着断裂高度的增加而增加;2) 多路栅尺电极横向断裂损伤主要引入周期内一次谐波误差;3) 栅尺电极出现划痕损伤时对测量精度影响不明显。本研究系统分析了纳米时栅位移传感器的栅尺损伤误差特性,对后续提升传感器长期性能可靠性和环境适应性具有理论指导意义。

参考文献

- [1] 谭久彬. 超精密测量技术与仪器是高端制造发展的前提与基础[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3):

- 11-12.
- Tan Jiubin. Ultra-precision measurement technology and instruments are the prerequisite and foundation for the development of high-end manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 11-12.
- [2] Zhao M Q, Yuan Y Y, Luo L B, et al. A review: Absolute linear encoder measurement technology[J]. *Sensors*, 2025, 25(19): 5997.
- [3] 赵志财, 于海, 万秋华, 等. 光栅直线位移测量技术研究进展与展望[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(2): 51-61.
- Zhao Zhicai, Yu Hai, Wan Qiuhua, et al. Research progress and prospects of grating linear displacement measurement technology [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(2): 51-61.
- [4] Wang X H, Jiang W T, Zhao F N, et al. A novel peak positioning method for nanometer displacement measurement by optical linear encoder [J]. *Measurement*, 2025, 242: 115888.
- [5] 李强, 刘宏伟, 何韬, 等. 多通道光栅莫尔信号实时细分与等分平均技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(9): 189-196.
- Li Qiang, Liu Hongwei, He Tao, et al. Study on real-time subdivision and equal division averaging technology for multi-channel grating moiré signals [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(9): 189-196.
- [6] Zhao J B, Ou W C, Cai N, et al. Measurement error analysis and compensation for optical encoders: A review[J]. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1006230.
- [7] 李子文, 赵茂众, 杜伟, 等. 微型高精度光栅位移传感器设计及误差补偿[J]. *光学 精密工程*, 2025, 33(22): 3525-3535.
- Li Ziwen, Zhao Maozhong, Du Wei, et al. Miniature high-precision grating displacement sensor design and error compensation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(22): 3525-3535.
- [8] Shao C F, Li X H. Technologies for fabricating large-size diffraction gratings[J]. *Sensors*, 2025, 25(7): 1990.
- [9] 李春燕, 张亦舒, 侯少杰, 等. 传统光栅制备技术及非晶合金光栅制备研究进展[J]. *稀有金属*, 2024, 48(12): 1766-1780.
- Li Chunyan, Zhang Yishu, Hou Shaojie, et al. Research progress of traditional grating preparation technology and amorphous alloy grating preparation [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2024, 48(12): 1766-1780.
- [10] 王磊杰, 张鸣, 朱煜. 单体大尺寸高精度全息光栅制造技术综述[J]. *光学 精密工程*, 2021, 29(8): 1759-1768.
- Wang Leijie, Zhang Ming, Zhu Yu. Review of monomeric large-size and high precision holographic planar grating manufacturing technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1759-1768.
- [11] Zhang T, Zhao X Y, Cui J W, et al. Influence of asymmetric grating structures on measurement accuracy in integrated phase grating interference-based metrology[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(7): 1847-1854.
- [12] 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): 2591-2611.
- Li Xinghui, Cui Can. Grating interferometric precision nanometric measurement technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(17): 2591-2611.
- [13] Xiong X M, Wang P, Du H, et al. Synthetic model of nonlinear errors in grating displacement measurement system [J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(6): 064108.
- [14] 杨超, 周鹏, 周润森, 等. 刻划光栅刻线弯曲误差在线修正技术研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(4): 658-662.
- Yang Chao, Zhou Peng, Zhou Runsen, et al. Research on on-line correction technology for ruled grating curved surface errors [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(4): 658-662.
- [15] Ban Y W, Zhao G B, Zhang Z H, et al. Study on the influence of surface roughness on the diffraction efficiency of two-dimensional gratings[J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 28701-28715.
- [16] Wu S, Wang J S, Fang F Z, et al. Effect of sidewall roughness on the diffraction efficiency of EUV high aspect ratio freestanding transmission gratings [J]. *Optics Express*, 2022, 30(22): 40413-40424.
- [17] 孙澳, 王瑞鹏, 孙雨琦, 等. 高衍射效率偏振无关合束光栅的双层梯形槽形设计与分析[J]. *中国光学*, 2025, 18(1): 53-62.
- Sun Ao, Wang Ruipeng, Sun Yuqi, et al. Design and analysis of a double-layer trapezoidal groove of polarization-independent beam-combining gratings with high diffraction efficiency [J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 53-62.

- [18] Yang C, Chen X. Effect of grating ruling machine system errors on grating spectral performance [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(19): 10174.
- [19] Hsieh H C, Wu M R, Huang X T. Designing highly precise overlay targets for asymmetric sidewall structures using quasi-periodic line widths and finite-difference time-domain simulation [J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4482.
- [20] 姚云飞, 高旭. 基于叠栅条纹投影成像的差动式光栅位移测量系统[J]. *光学学报*, 2024, 44(14): 143-151.
- Yao Yunfei, Gao Xu. Differential motion grating displacement measurement system based on moiré fringe projection imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(14): 143-151.
- [21] Li W H, Wang X Y, Bayanheshig, et al. Controlling the wavefront aberration of a large-aperture and high-precision holographic diffraction grating [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 112.
- [22] 李玉海, 白清顺, 孙浩, 等. 大口径衍射光栅的污染损伤与清洗技术研究进展[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(9): 270-282.
- Li Yuhai, Bai Qingshun, Sun Hao, et al. Research progress on contamination damage and cleaning technology of large-aperture diffraction grating[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(9): 270-282.
- [23] Liu X K, Huang R, Yu Z C, et al. A high-accuracy capacitive absolute time-grating linear displacement sensor based on a multi-stage composite method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(7): 8969-8978.
- [24] 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 Kai, Yu Zhicheng, Liu Xiaokang, et al. Novel nanometer time-grating displacement sensor with single row differential structure [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3): 734-740.
- [25] Pu H J, Chen L, Fan X C, et al. An absolute time-grating linear displacement sensor with a multilayer

cascade structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(10): 16684-16692.

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研究员, 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 sensors.



林栋, 2024年于湖南工程学院获得学士学位, 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: 13985622498@163.com

Lin Dong received his B. Sc. degree from Hunan Institute of Engineering in 2024. He is currently a master degree student at Chongqing University of Technology. His main research interests include sensor technology and intelligent instruments.



彭凯(通信作者), 2010年于重庆大学获得学士学位, 2013年于重庆理工大学获得硕士学位, 2017年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学副研究员, 主要研究方向为微纳传感理论和智能仪器。

E-mail: pk@cqu.edu.cn

Peng Kai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2010, M. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2013, and Ph. D. degree from Chongqing University in 2017. He is currently an associate research fellow at Chongqing University of Technology. His main research interests include micro and nano sensing theory and intelligent instruments.