

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513901

二次耦合的绝对式直线时栅位移传感器^{*}

杨继森¹,易靖松¹,秦小东²,曹峻杰¹,张 静³

(1. 重庆理工大学机械工程学院 重庆 400054; 2. 重庆铁马工业集团有限公司 重庆 400050;
3. 重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘要:针对精密制造、航空航天工业及军事应用等领域对精密直线绝对位移测量的需求,提出了一种二次耦合的绝对式直线时栅位移传感器,其定尺采用离散分布式无源设计,避免了传统设计中定尺线圈层间连接过孔带来的分布电感与分布电容,提高了感应磁场的连续性与均匀性;激励信号与感应信号的处理集中于动尺侧,只需在动尺侧布置引线,磁场的耦合限制在激励线圈范围内,从而有效抑制传感器定尺上未被基体覆盖的线圈与环境中各种电磁波耦合带来的高次谐波干扰,同时拓宽了传感器的应用领域。首先,建立平面瞬态磁场耦合模型,构建双列绝对式传感器测量模型及其传感机理,采用对极数互质的绝对位移解算方案,扩大了绝对位移测量中误差允许范围,提高了绝对位移解算的准确性;并提出了一种同频调制的信号解耦方法,通过优化信号处理机制,在实现传感器高信噪比的同时,显著降低传感器对ADC采样率的要求,解决了ADC采样率与分辨率之间的矛盾;通过电磁场有限元仿真,对传感器进行了理论验证和误差分析,确定了传感器优化安装间隙为0.5 mm。最后,采用PCB工艺制作传感器样机并开展相关实验研究,实验结果表明,传感器在203 mm的有效测量范围内能够实现绝对位移测量,其原始测量误差为-12.62~+3.23 μm。

关键词:直线位移传感器;绝对位移测量;对极数互质;同频调制

中图分类号: TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 4030

Absolute linear time-grating displacement sensor based on secondary coupling

Yang Jisen¹, Yi Jingsong¹, Qin Xiaodong², Cao Junjie¹, Zhang Jing³

(1. School of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. Chongqing Tiema Industrial Group Co., Ltd, Chongqing 400050, China; 3. School of Electrical and
Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In response to the demand for precision linear displacement measurement in fields such as precision manufacturing, aerospace industry, and military applications, an absolute linear time-grating displacement sensor based on secondary coupling is proposed. The fixed scale employs a discretely distributed passive design, which avoids the distributed inductance and capacitance caused by interlayer connection through-holes in traditional designs, thereby improving the continuity and uniformity of the induced magnetic field. Both excitation and sensing signal processing are concentrated on the slider side, requiring only the arrangement of leads on the slider side, with magnetic coupling confined to the excitation coil area. This design effectively suppresses interference from electromagnetic coupling between uncovered coils on the stator and ambient electromagnetic waves, while expanding the sensor's application scope. First, a planar transient magnetic field coupling model is established, and a dual-array absolute sensor measurement model with its sensing mechanism is constructed. By using a coprime pole-number absolute displacement calculation scheme, the allowable error range in absolute displacement measurement is expanded, and the accuracy of absolute displacement calculation is improved. Additionally, a novel same-frequency modulation signal decoupling method is proposed, which achieves a high signal-to-noise ratio while significantly reducing ADC sampling rate requirements by optimizing the signal processing mechanism, thus resolving the contradiction between ADC sampling rate

and resolution. Through electromagnetic finite element simulation, theoretical verification and error analysis of the sensor are conducted, determining the optimal installation gap to be 0.5 mm. Finally, sensor prototypes are fabricated using PCB technology, and experimental studies are performed. The experimental results show that the proposed sensor can achieve absolute displacement measurement within a range of 203 mm, with original measurement errors ranging from -12.62 to +3.23 μm .

Keywords: electromagnetic sensor; absolute displacement measurement; coprime pole numbers; same-frequency modulation

0 引言

随着制造业的蓬勃发展,精密制造、航空航天工业和军事应用等领域对高精度直线绝对位移测量的需求日益增加^[1-3]。高精度直线位移传感器可以分为增量式和绝对式两种类型,其中增量式位移传感器提供相对参考零点位置信息,而绝对式位移传感器则直接输出绝对零点位置信息^[4]。与增量式传感器相比,绝对式传感器无需通过累积计算,能够有效避免累积误差,具有高精度、强抗干扰能力以及较高的可靠性^[5-7]。此外,绝对式传感器上电后无需重新归零,进一步减少了操作复杂性,因此在工业生产制造、科学研究等领域得到了广泛应用^[8-10]。

绝对式光栅传感器以高精度、高分辨率等优点成为了当前市场上的主流产品,其采用超精密刻划的栅线作为基准^[11-12]。德国海德汉(HEIDENHAIN)^[13]公司生产的LIC 4100系列,在3040 mm测量范围内可达 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的精度。虽然研究人员通过各种误差补偿方法不断提升其性能,但受制于光学衍射极限以及超精密刻划技术的局限性,测量精度难以进一步提高^[14-16]。并且光栅传感器的核心技术和相关专利绝大部分被外国公司所控制,对我国形成了技术壁垒^[17-18]。

我国拥有完全自主产权的时栅位移传感器基于时空坐标转换理论(time space transformation, TST),创新性地将空间量测量转化为时间量测量,有效规避了传统光栅制造中对精密刻线工艺的依赖^[19-23]。针对磁场式绝对时栅位移传感器,诸多学者对此展开了研究,陈自然等^[24]提出了一种差极结构的绝对式时栅位移传感器,通过多尺度组合测量技术进行绝对定位,传感器定尺采用双列结构,两列对极数相差1,每列中正弦绕组和余弦绕组呈“几”字形布置,并保持1/4极距的空间间隔,经误差修正后传感器样机在90 mm范围内测量精度为 $\pm 1.2 \mu\text{m}$,分辨力为0.1 μm ;杨继森等^[25]提出了一种多频磁场耦合的绝对式直线时栅位移传感器,传感器定尺由双层交替绕线结构的两列增量式码道组成,两列码道的对极数互为质数,并分别由不同频率的电流信号同时激励,传感器样机在140 mm的测量范围内实现了 $\pm 17.34 \mu\text{m}$ 的测量精度;赵静等^[26]研制了一种互补谐振耦合型电磁式绝对直线位移传感器,该传感器采用2个结构完全相同的动尺对称分布于定尺两侧,与定尺形成互补耦合结构,传感器

样机实验表明,在300 mm范围内,原始测量误差为 $-8 \sim +5 \mu\text{m}$ 。

然而,前期研究的磁场式时栅位移传感器定尺线圈的设计多采用首尾串联的双层连续正反绕制结构,此设计存在3个主要不足:1)定尺上未被基体覆盖的线圈易与环境中各种电磁波发生耦合,产生高次谐波干扰,影响感应信号质量;2)传感器在定尺与动尺两侧均需布置引线,制约了传感器的应用范围;3)双层结构线圈间通过过孔实现层间连接,这些过孔破坏了磁场的连续性与均匀性,导致感应磁场分布不均,从而影响测量精度。

针对上述问题,本研究提出一种二次耦合的绝对式直线时栅位移传感器,定尺采用离散分布式无源设计,避免了过孔,消除传统设计中定尺线圈过孔引起的高次谐波干扰,激励信号和感应信号均在动尺侧进行处理,使磁场的耦合仅在激励线圈范围内,从而抑制传感器定尺上未被基体覆盖的线圈与环境中各种电磁波耦合带来的干扰,同时拓宽传感器的应用领域。并提出一种同频调制的信号解耦方法,通过优化信号处理机制改善解耦信号的纯净度与信噪比,在维持传感器高分辨力的同时,提高传感器测量精度。

1 传感器结构及工作原理

1.1 传感器瞬态磁场耦合模型

传感器磁场的耦合发生了2次,第1次为定尺上的耦合线圈与动尺上激励线圈产生的磁场相耦合,如图1所示。

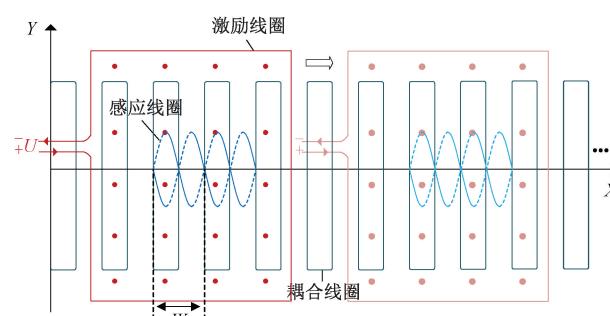


图1 第1次耦合

Fig. 1 First coupling

设激励线圈中通入交流激励 $i(t) = I_m \sin(\omega t)$, 其中 I_m 为激励电流幅值、 ω 为激励信号角频率。则每个包络在激励线圈内的节距为 W 的耦合线圈产生的感应电动势大小为:

$$e = k_1 \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中: k_1 为耦合比例系数, 与激励电流幅值和频率成正比, 当动尺相对定尺发生位移时, 激励线圈产生的磁场相应地发生空间移动。

在感应电动势 e 的作用下, 每个耦合线圈中心区域产生与激励线圈产生的磁场方向相反的近似均匀的磁场, 其磁场强度 B 可表示为:

$$B = k_2 \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中: k_2 为耦合比例系数, 此处仅作理论分析, 不作定量研究。动尺上的差动型正弦感应线圈与该磁场发生电磁耦合, 如图 2 所示(图 2 中激励线圈已略去)。

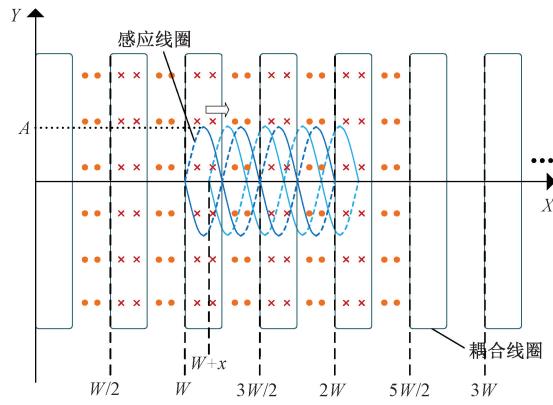


图 2 第 2 次耦合

Fig. 2 Second coupling

当正弦型平面线圈沿测量方向(X 方向)运动 x 时, 正弦型平面线圈拾取到的磁通为:

$$\begin{aligned} \varphi(t, x) &= k_3 B \int_x^{W/2} A \sin\left(\frac{2\pi}{W}(l-x)\right) dl - \\ &k_3 B \int_{W/2}^{x+W/2} A \sin\left(\frac{2\pi}{W}(l-x)\right) dl = \\ &\frac{k_2 k_3 W A}{\pi} \cos(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{W}x\right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: k_3 为比例系数, 与感应线圈对极数成正比; $0 < x < W/2$; A 为正弦平面线圈轮廓曲线的幅值。

由于正弦型感应线圈的差动结构, 其上、下半周期部分与激励线圈产生的磁场耦合所产生的感应电动势呈反相分布, 实现互相抵消。因此, 该感应线圈仅与耦合线圈产生的磁场发生有效电磁耦合。

1.2 增量式传感器结构与工作原理

增量式时栅位移传感器包括定尺和与其正对平行且留有间隙的动尺, 结构如图 3 所示, 定尺基体上设有相互

独立的“回”字型耦合线圈, 动尺包括沿测量方向(X 方向)错开 $W/4$ 的按正弦形状布置的“sin”与“cos”感应线圈和设置在感应线圈外围的矩形激励线圈。

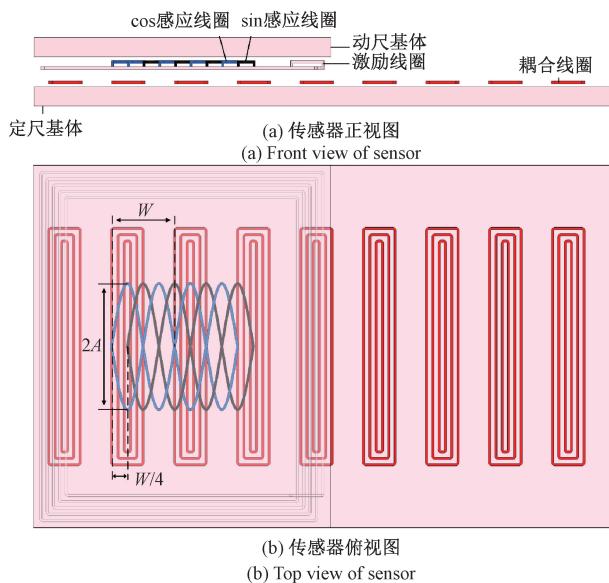


图 3 增量式直线时栅位移传感器结构

Fig. 3 Incremental linear time grating displacement sensor structure

给激励线圈通入幅值为 I_m , 角频率为 ω 的交流激励电流 $i(t) = I_m \sin(\omega t)$, 当动尺相对定尺在测量方向发生平行移动, 感应线圈拾取到的磁通量发生变化, 而磁通量的变化被转换为感应电动势的变化, sin 与 cos 感应线圈生成在空间上相差 $\pi/4$ 的驻波信号, 分别为:

$$e_{\sin} = k_s \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{W}x\right) \quad (4)$$

$$e_{\cos} = k_s \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{W}x\right) \quad (5)$$

式中: k_s 为比例系数。两路感应信号与激励信号 $i(t)$ 同频率, 且幅值随着动尺相对于定尺的位移 x 发生周期性变化, 因此 e_{\sin} 和 e_{\cos} 为携带了空间位置信息的驻波信号。两路感应信号经过放大、滤波、同频调制后相除, 对结果求反正切, 得到 $2\pi x/W$ 的值, 再对其进行换算, 求出增量位移 x 。

1.3 双列绝对式传感器结构设计与工作原理

双列绝对式时栅位移传感器的模型如图 4 所示。该传感器同样由定尺和动尺组成, 包括由精机耦合线圈和精机感应线圈构成的“精机通道”、由粗机耦合线圈和粗机感应线圈构成的“粗机通道”, “精机通道”用于精确测量动尺相对定尺的对极内增量位移, “粗机通道”用于确定动尺所经过的耦合线圈的对极数。

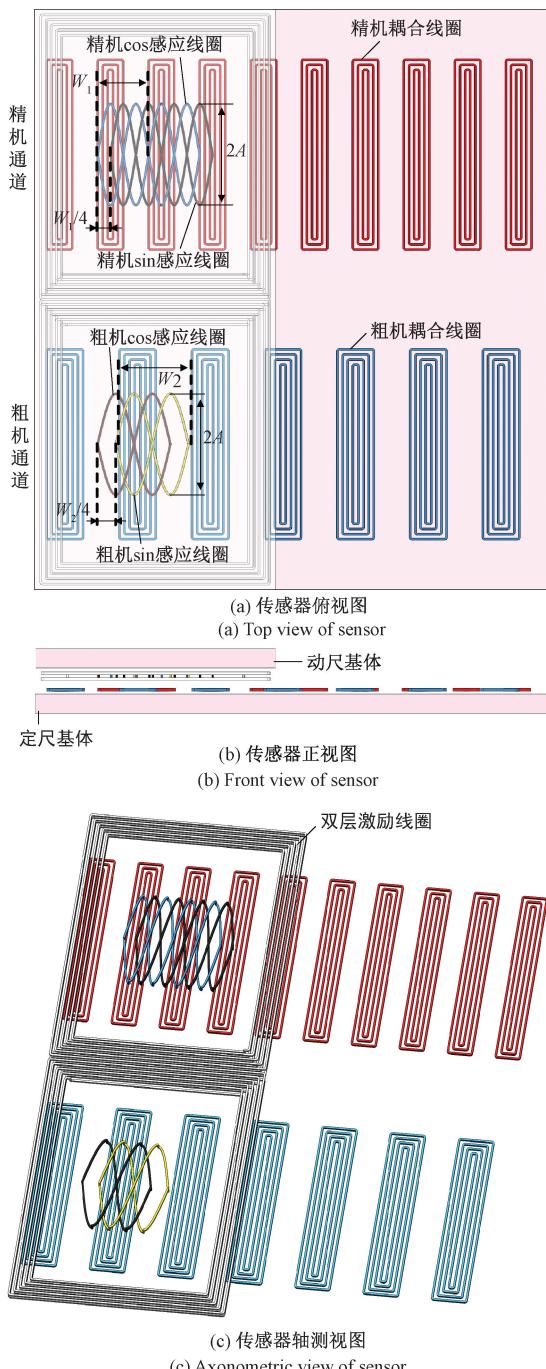


图 4 绝对式直线时栅位移传感器结构

Fig. 4 Absolute linear time grating displacement sensor structure

传感器的量程 L 如式(6)所示,

$$L = N \times W_1 - \max\left(J \times W_1 + \frac{W_1}{4}, K \times W_2 + \frac{W_2}{4}\right) \quad (6)$$

其中, W_1 为“精机通道”的节距, N 为精机耦合线圈对极数, J 为精机感应线圈对极数, W_2 为“粗机通道”的

节距, K 为粗机感应线圈对极数。 $N \times W_1 = M \times W_2$, M 为粗机耦合线圈对极数, 且 M, N 互为质数。

各个耦合线圈的布置无需过孔, 且相互独立, 避免了由于过孔和空中电磁波给传感器带来的高次谐波干扰。且为了减小“精机通道”与“粗机通道”之间的相互串扰, 由双层正绕平面矩形螺旋线圈和反绕平面矩形螺旋线圈串联构成激励线圈, 实现了两个通道之间的隔离。激励信号和感应信号均在动尺侧进行处理, 实现了定尺的无源设计, 简化了传感器结构, 拓展了传感器的使用范围。

给激励线圈通入角频率为 ω 的交流激励电信号 $i(t)$, 当动尺相对于定尺发生相对运动时, 精机感应线圈输出两路携带位移信息的驻波信号经放大滤波后为 E_1, E_2 , 粗机感应线圈同时输出两路携带位移信息的驻波信号经放大滤波后为 E_3, E_4 , 继而对 4 路驻波信号进行同频调制处理。

$$\begin{cases} i = A \sin(\omega t) \\ E_1 = k_6 \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{W_1} x_1\right) \\ E_2 = k_6 \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{W_1} x_1\right) \\ E_3 = k_7 \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{W_2} x_2\right) \\ E_4 = k_7 \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{W_2} x_2\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: k_6, k_7 为比例系数; x_1, x_2 分别为“精机通道”与“粗机通道”的增量位移。

1.4 同频调制实现原理

当前提高传感器信噪比最有效方法是提高传感器的激励频率, 时栅传感器的激励频率通常达到 1 MHz, 感应信号的频率也随之达到 1 MHz, 这就对模拟数字转换器 (analog to digital converter, ADC) 的采样率提出了极高的要求, 而高采样率的 ADC 往往以分辨率降低为代价, 进而限制传感器测量精度, 针对这一技术矛盾, 提出了一种同频调制的信号处理方法, 在实现传感器高信噪比的同时, 显著降低传感器对 ADC 采样率的要求。

同频调制的原理如图 5 所示, 由微控制单元 (microcontroller unit, MCU) 产生与激励信号同频率的幅值为 A_p 的方波信号 U_p , 将感应驻波信号接入由 U_p 控制的模拟开关, 输出结果等效为感应信号与方波信号 U_p 相乘。

将方波信号 U_p 按傅里叶级数展开得:

$$U_p = \frac{4A_p}{\pi} \sin(\omega t) + \frac{4A_p}{3\pi} \sin(3\omega t) + \frac{4A_p}{5\pi} \sin(5\omega t) + \dots \quad (8)$$

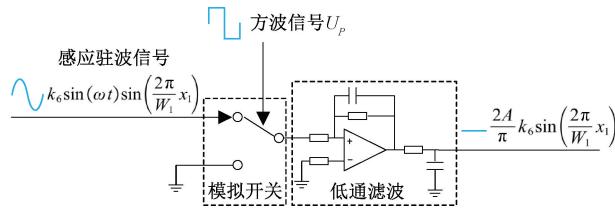


Fig. 5 Same-frequency modulation principle

再将式(8)与感应信号 E_1 相乘,输出信号 U_{mix} ,即:

$$\begin{aligned} U_{\text{mix}} = & \frac{2A_p}{\pi} k_6 \left[\sin\left(\frac{2\pi x_1}{W_1}\right) - \cos(2\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x_1}{W_1}\right) + \right. \\ & \left. \frac{1}{3} \cos(2\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x_1}{W_1}\right) - \frac{1}{3} \cos(4\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x_1}{W_1}\right) + \dots \right] \end{aligned} \quad (9)$$

将 U_{mix} 通过低通滤波器滤掉高频信号,得到与位移 x_1 有关的直流信号 U_1 ,即:

$$U_1 = \frac{2A_p}{\pi} k_6 \sin\left(\frac{2\pi}{W_1} x_1\right) \quad (10)$$

同理,将感应信号 E_2, E_3, E_4 分别经过同频调制后得到直流信号 U_2, U_3, U_4 ,即:

$$\begin{cases} U_2 = \frac{2A_p}{\pi} k_6 \cos\left(\frac{2\pi}{W_1} x_1\right) \\ U_3 = \frac{2A_p}{\pi} k_7 \sin\left(\frac{2\pi}{W_2} x_2\right) \\ U_4 = \frac{2A_p}{\pi} k_7 \cos\left(\frac{2\pi}{W_2} x_2\right) \end{cases} \quad (11)$$

将 4 路直流信号经过直流偏置补偿以适配 ADC 输入范围,随后用 ADC 分别对“粗、精机通道”同步采样,并将采集到的数字信号送入 MCU 进行后续处理。

1.5 传感器信号生成与处理方法

传感器信号生成与处理流程如图 6 所示,MCU 生成的方波信号经带通滤波后转换成正弦波信号,再经功率放大后通入激励线圈;感应线圈输出 4 路携带位移信息的感应驻波信号 E_1, E_2, E_3, E_4 ,4 路感应信号分别经过放大、滤波以及同频调制后得到 U_1, U_2, U_3, U_4 ,用 ADC 分别对 U_1 与 U_2, U_3 与 U_4 进行同步采样;采集到的数字量送入 MCU 后,分别对 U_1 与 U_2, U_3 与 U_4 做除法运算,对相除结果求反正切,得到 $2\pi x_1/W_1$ 与 $2\pi x_2/W_2$ 的值,再经换算,求出“精、粗机通道”的增量位移 x_1, x_2 ,最后采用绝对位移解算方法解算出动尺相对于定尺的绝对位移值。

1.6 绝对位移解算方法

传感器采用“对极数互质”绝对位移解算方法,相较于常用的“差极”绝对位移解算方法,有更大的误差限,

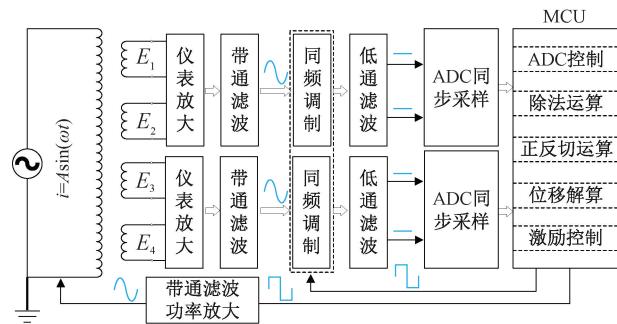


图 6 信号生成与处理流程

Fig. 6 Signal generation and processing flow

能在保证高精度的前提下,更准确地实现绝对位移的解算,绝对位移求解流程如图 7 所示。

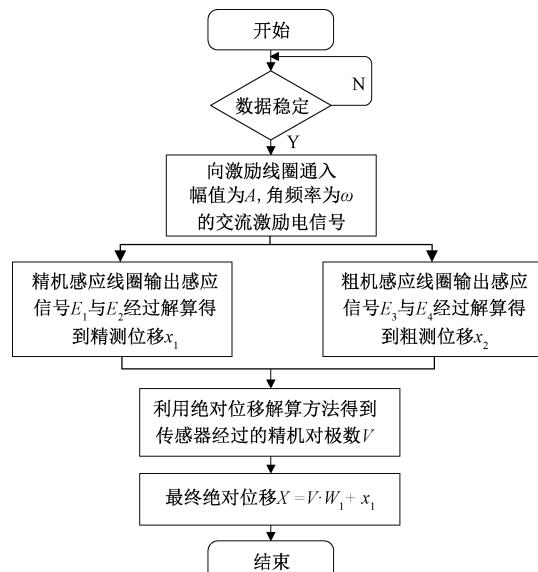


图 7 绝对位移求解流程

Fig. 7 Flowchart for absolute displacement calculation

以精机耦合线圈对极数 $N = 5$,粗机耦合线圈对极数 $M = 3$ 来说明绝对位移解算方法。在解算出“精、粗机通道”的增量位移 x_1, x_2 后,按式(12)得出“精、粗机通道”的对极内位移差 Δx 。

$$\Delta x = \begin{cases} x_2 - x_1, & x_2 \geq x_1 \\ W_2 + x_2 - x_1, & x_2 < x_1 \end{cases} \quad (12)$$

在全量程范围内“精、粗机通道”增量位移与对极内位移差 Δx 的位置关系如图 8 所示, Δx 的值被分为了 5 个区域,分别对应 P_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$),且 $P_0 \sim P_4$ 各不相同。

将实际解算出的对极内位移差 Δx 与表 1 进行比较,即可得出传感器经过的精机对极数 V ,其中 $\Delta\varepsilon$ 为考虑到实际测量误差所设置的误差限, $\Delta\varepsilon = W_1/M$ 。

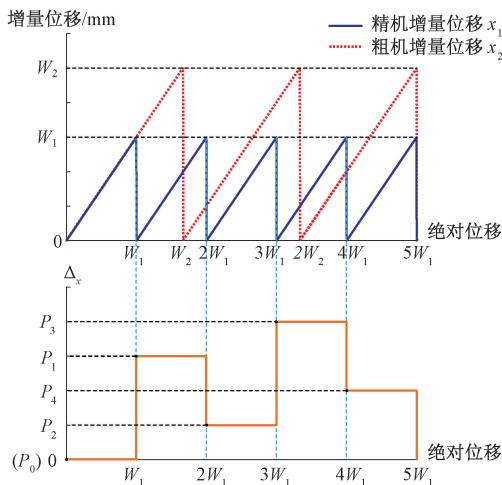


图 8 位置关系

Fig. 8 Position relationship

表 1 对极数判断对应表

Table 1 Epipolar judgment correspondence table

V	P_i	Δx 所在区间
0	0	($P_0 - \Delta\varepsilon, P_0 + \Delta\varepsilon$)
1	W_1	($P_1 - \Delta\varepsilon, P_1 + \Delta\varepsilon$)
2	$W_1/3$	($P_2 - \Delta\varepsilon, P_2 + \Delta\varepsilon$)
3	$4W_1/3$	($P_3 - \Delta\varepsilon, P_3 + \Delta\varepsilon$)
4	$2W_1/3$	($P_4 - \Delta\varepsilon, P_4 + \Delta\varepsilon$)

最后利用式(13)计算动尺相对于定尺的绝对位移 X 。

$$X = VW_1 + x_1 \quad (13)$$

2 传感器电磁场仿真与误差分析

2.1 传感器建模仿真

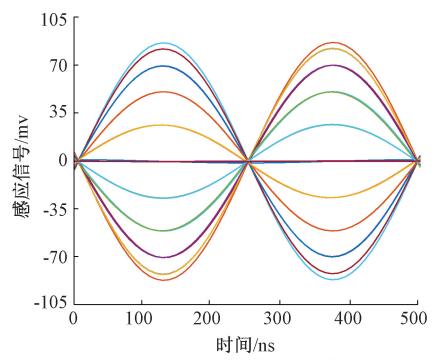
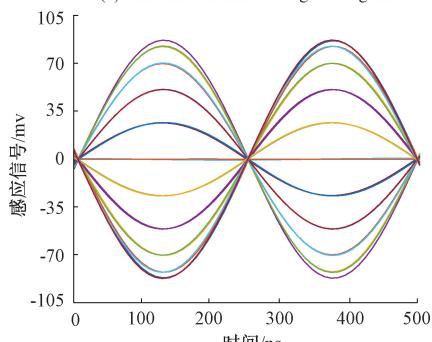
为了验证绝对式时栅直线位移传感器结构及其原理,用三维建模软件建立如图 4 所示的仿真模型,再将其导入有限元分析软件中进行电磁仿真并对仿真结果分析。传感器“精、粗机通道”的节距大小分别设置为 4 和 5.7 mm,精、粗机耦合线圈对极数为 57 和 40,其余仿真模型参数如表 2 所示。

以安装间隙 0.5 mm 为例,传感器模型电磁仿真结果如图 9 所示,图 9 中每条曲线表示传感器在不同位置时的感应电动势,每个感应线圈输出的感应电信号都为携带位移信息的正弦或余弦驻波信号,驻波信号的幅值与位移值形成对照关系。与式(7)对应的函数波形一致,证实了理论推导的正确性,从而验证了传感器结构及其工作原理的可行性。

表 2 仿真模型参数

Table 2 Simulation model parameters

仿真参数名	参数值
激励电流幅值/A	0.1
激励电流频率/MHz	2
线圈匝数/匝	1
气隙间距/mm	0.4/0.5/0.6
线圈宽度/mm	0.15
激励线圈高度/mm	45
感应线圈高度/mm	8
耦合线圈高度/mm	15
感应线圈阻抗/ Ω	2
导磁体材料	Steel_1008
线圈材料	Copper
精机通道仿真距离/mm	4.0
粗机通道仿真距离/mm	5.7
精机通道运动步长/mm	0.2
粗机通道运动步长/mm	0.3
仿真时长/ns	500
仿真时间步长/ns	10

(a) 精机sin感应线圈输出信号
(a) Fine channel sin sensing coil signal(b) 精机cos感应线圈输出信号
(b) Fine channel cos sensing coil signal

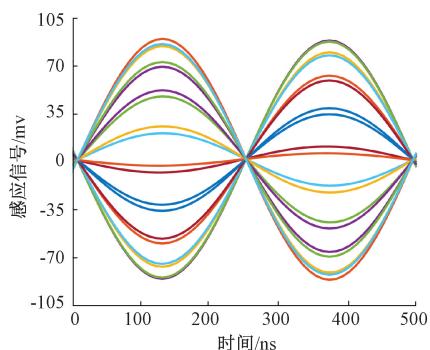
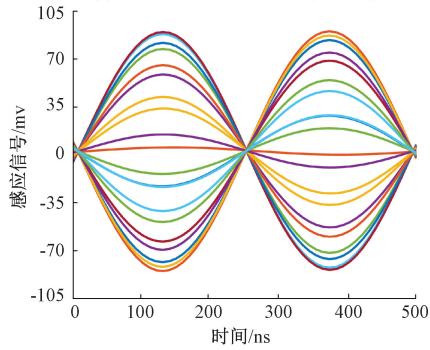
(c) 粗机sin感应线圈输出信号
(c) Coarse channel sin sensing coil signal(d) 粗机cos感应线圈输出信号
(d) Coarse channel cos sensing coil signal

图 9 感应线圈输出驻波感应信号

Fig. 9 Induction coil output standing wave induction signal

2.2 传感器仿真误差分析

调整传感器激励线圈与感应线圈的间隙分别为 0.4、0.5 和 0.6 mm, 进行电磁场仿真, 分别将各气隙下的仿真结果与理论值做差, 得到误差曲线如图 10 所示。

在不同安装气隙下, “精、粗机”误差峰峰值均小于误差限 $\Delta\epsilon = 100 \mu\text{m}$, 证明了传感器能够稳定、可靠地实现绝对位置定位与测量。

由于传感器“粗机通道”仅用于绝对位置定位, 而“精机通道”用于精确测量, 故本研究优先对“精机通道”的安装气隙参数与测量误差进行分析, 对精机误差

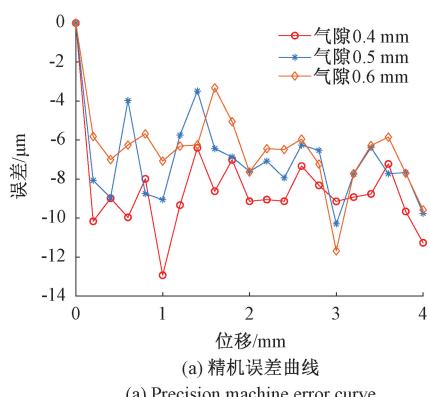
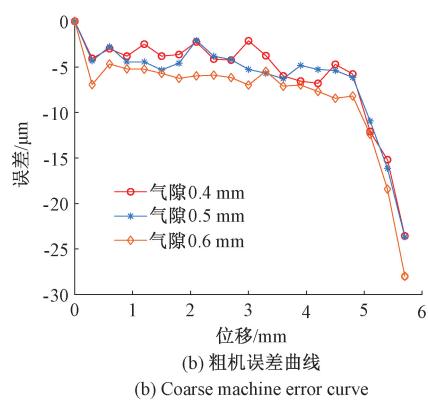
(a) 精机误差曲线
(a) Precision machine error curve(b) 粗机误差曲线
(b) Coarse machine error curve

图 10 仿真误差曲线

Fig. 10 Simulation error curve

数据进行快速傅里叶变换, 得到如图 11(a) 所示的误差频谱图。

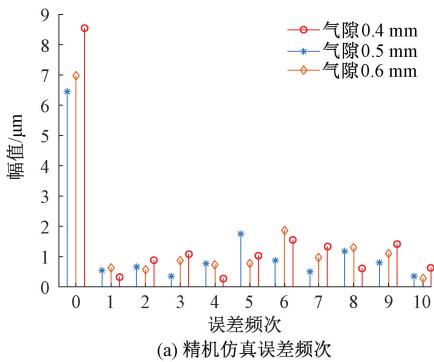
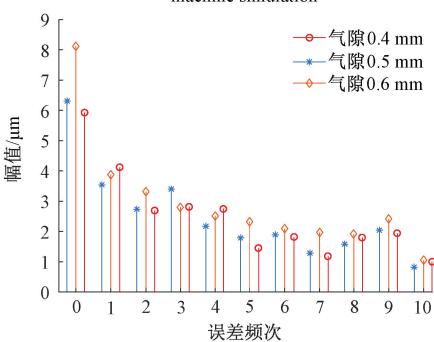
(a) 精机仿真误差频次
(a) Precision of error in precision machine simulation(b) 粗机仿真误差频次
(b) Coarse of error in precision machine simulation

图 11 误差频谱

Fig. 11 Error spectrum

精机不同安装气隙下的误差分析总结表如表 3 所示, 0.5 mm 为传感器推荐安装间隙, 在此安装气隙条件下, 传感器“精机通道”对极内位移误差峰峰值最小, 为 $10.3 \mu\text{m}$, 主要误差频次为 0 次, 除此之外, 其余频次的误差分量的幅值相对较小。

表 3 误差分析总结

Table 3 Error analysis summary

安装间隙/mm	误差峰峰值/ μm	主要误差频次	主要误差频次幅值/ μm
0.4	12.93	0	8.54
0.5	10.30	0	6.45
0.6	11.68	0	6.97

3 实验验证

3.1 实验系统搭建

根据上述双列绝对式时栅传感器电磁仿真模型,采用低成本、高可靠性和易于加工的印刷电路板(printed circuit board, PCB)技术制作传感器样机,如图 12 所示,传感器“精、粗机通道”节距分别为 4 和 5.7 mm,耦合线圈对极数分别为 57 和 40,感应线圈对极数分别为 6 和 4,则传感器有效测量范围 $L = 203$ mm。

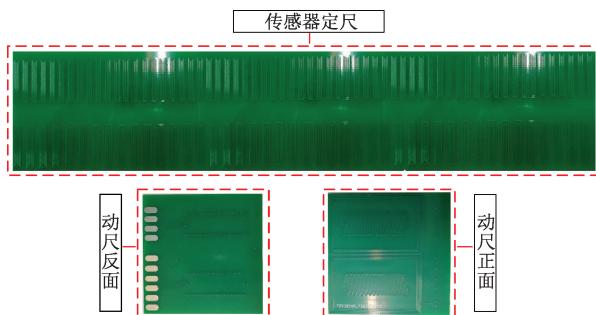


图 12 传感器样机

Fig. 12 Sensor prototype

搭建如图 13 所示的一维精密测量实验系统以测试传感器性能,该系统采用海德汉公司(HEIDENHAIN)的直线光栅尺 LF481 搭配光栅细分盒作为基准来标定实验样机,光栅栅距为 4 μm ,光栅细分盒设置为 100 倍细分后,每个信号脉冲当量为 0.04 μm ;实验样机、海德汉光栅传感器、伺服电机三者安装在大理石抗震平台上。实验时,将传感器样机动尺安装在滚珠丝杠导轨上,定尺固定在平台上,伺服电机同时带动直线光栅尺和传感器样机在测量方向移动,以直线光栅尺测量值为真值,通过对比直线光栅尺和传感器样机所测得的位移值来对传感器样机进行误差分析。

3.2 传感器样机实验与误差分析

为了降低噪声信号对传感器测量精度的影响,提高测量的稳定性和抗干扰能力,将原始频率为 2 MHz 的方波激励信号经带通滤波器转换为纯净的正弦波信号。动

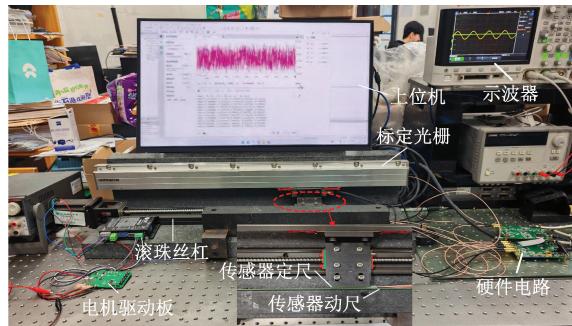


图 13 一维精密测量实验系统

Fig. 13 One-dimensional precision measurement experimental system

尺上的“精、粗机”感应线圈输出的原始驻波感应信号经 100 倍仪表放大,且随着传感器动尺移动,感应信号峰峰值发生变化,如图 14 所示。

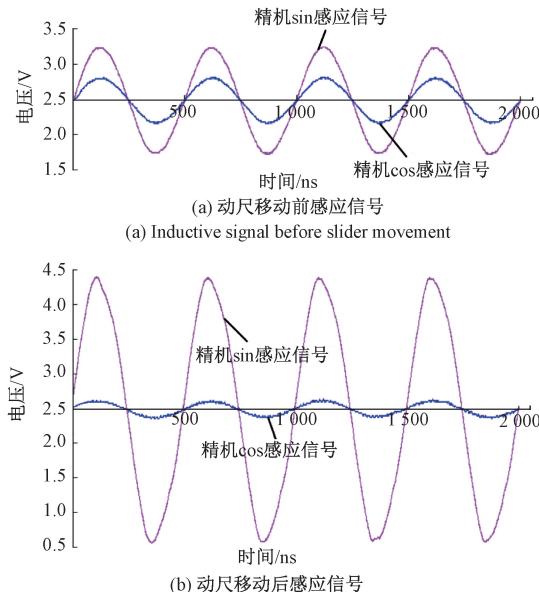
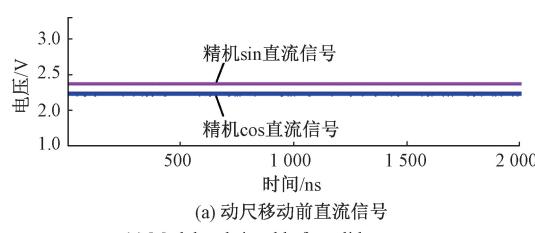


图 14 动尺移动前后感应信号

Fig. 14 Inductive signals before and after slider movement

如图 15 所示,经同频调制处理后的感应信号转化为直流特性输出,其幅值随传感器位移变化呈现相应起伏,直观反映了位置参数与电信号强度间的对应关系,与理论推导一致。



(a) Modulated signal before slider movement

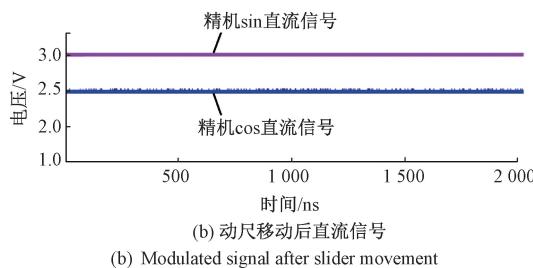


图 15 动尺移动前后直流信号

Fig. 15 DC signals before and after slider movement

首先进行传感器最佳安装间隙验证实验,调整安装间隙分别为 0.4、0.5、0.6 mm,让动尺以 0.2 mm 步长移动一个精机节距(4 mm),将时栅测量值与光栅测量值作差得到误差曲线并对其做快速傅里叶变换分析,得到如表 4 所示的不同安装间隙下误差对比,其中传感器在安装间隙为 0.5 mm 时误差峰峰值最小,为 13.78 μm ,主要误差频次为 0 和 2 次,与仿真部分结果一致。

表 4 不同安装间隙下误差对比

Table 4 Error comparison with different installation gaps

安装间隙/mm	误差峰峰值/ μm	主要误差频次	主要误差幅值/ μm
0.4	15.53	0,2	9.62,4.88
0.5	13.78	0,2	8.29,4.76
0.6	14.95	0,2	8.94,5.51

进行传感器的对极内精度测量实验,将气隙高度设置为 0.5 mm,控制动尺以 0.2 和 0.3 mm 步长分别运动一个精机节距(4 mm)和一个粗机节距(5.7 mm),其对极内误差如图 16(a)所示,精机对极内误差峰峰值为 13.78 μm ,粗机对极内误差峰峰值为 32.39 μm ,均小于误差限 $\Delta\varepsilon = 100 \mu\text{m}$ 。对误差曲线进行快速傅里叶变换分析,得到误差频谱分布图(图 16(b))。精机频谱分析表明,0 次(直流分量)和 2 次谐波分量在误差成分中占主导地位,根据文献[27],0 次误差源自于其他频次误差的叠加,这种叠加造成实测的零位相对于真实零位有所偏移,进而导致整体结果相对于真实值都发生了系统性偏移;2 次谐波误差主要由传感器定尺与动尺未能完全平行正对安装、sin 与 cos 感应线圈未能严格保持空间正交(即相差 1/4 个节距)所造成。

为验证传感器的测量稳定性,控制动尺运动到一定位置后保持静止,每隔 2 s 采集一次信号并进行绝对位置解算,连续采集 10 000 个数据点,通过分析位移测量值的波

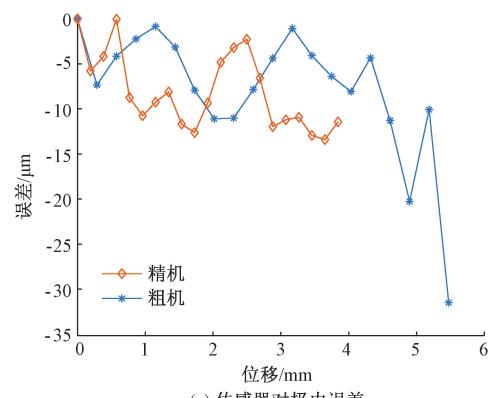
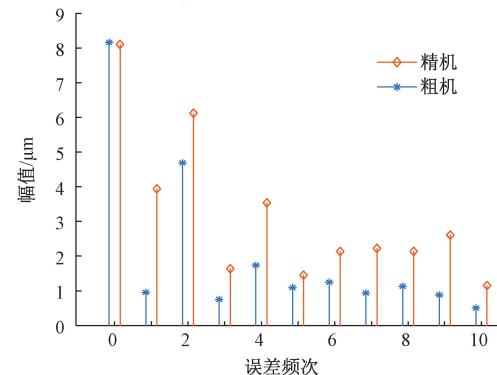
(a) 传感器对极内误差
(a) Sensor intra-polar error(b) 传感器误差频谱
(b) Sensor Error Spectrum

图 16 传感器对极内误差

Fig. 16 Sensor intra-polar error

动来评估系统稳定性。传感器稳定性测试结果如图 17 所示,由图 17 可知,传感器位移波动幅值<0.5 μm 。

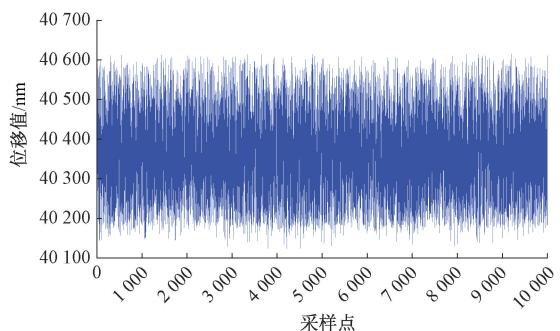


图 17 传感器稳定性测试

Fig. 17 Sensor stability test

最后对传感器进行满量程精度测试,以 0.5 mm 为步长控制动尺在传感器有效测量范围(0~203 mm)内平行移动,共采集 407 个位移点数据。测试结果如图 18 所示,传感器满量程位移误差峰峰值为 15.85 μm ,有效抑制了增量式传感器的累计误差。传感器的解算位移值与标准位移值呈现高度线性关系。

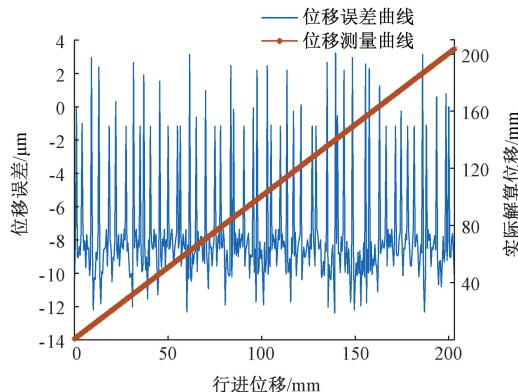


图 18 满量程精度测试结果
Fig. 18 Full-scale accuracy test results

4 结 论

本研究基于磁场式直线位移传感器原理,提出了一种二次耦合的绝对式直线时栅位移传感器,该传感器定尺采用离散分布式无源设计,激励信号与感应信号的处理集中于动尺侧,使磁场的耦合仅限制在激励线圈范围内,从而有效抑制传感器定尺上未被基体覆盖的线圈与环境中各种电磁波耦合导致的高次谐波干扰,同时拓宽传感器的应用领域。并提出了一种同频调制的信号解耦方法,通过优化信号处理机制改善解耦信号的纯净度与信噪比,在维持传感器高分辨率的同时,提高了传感器测量精度。通过电磁场仿真实验验证了传感器结构设计的可行性,并分析出测量误差主要为0次(直流分量)误差。采用印刷电路板技术加工了传感器样机,并搭建了实验平台进行实验验证,传感器对极内精度实验结果表明,传感器对极内位移误差峰值为 $13.78\text{ }\mu\text{m}$ 。最后对传感器进行稳定性实验和满量程精度实验,实验显示位移波动幅值 $<0.5\text{ }\mu\text{m}$,在 203 mm 的测量范围内,位移误差峰值为 $15.85\text{ }\mu\text{m}$,且有效抑制了增量式传感器的累计误差。在未来的研究中,将深入探究节距、线宽、材料等结构参数对测量误差的影响规律,进一步优化传感器设计与信号处理算法,提高传感器的测量精度,对高精度绝对式位移传感器的理论研究与工程应用具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] LIU C H, JYWE W Y, JENG Y R, et al. Design and control of a long-traveling nano-positioning stage [J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 497-506.
- [2] LIU Q, WANG M, TAO Y F, et al. Implementation of real-time displacement precision measurement technology for the sinusoidal phase-shifting laser self-mixing interferometer [J]. Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, 2015: 44607.
- [3] 谈宜东, 徐欣, 张书练, 等. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 228-249.
TAN Y D, XU X, ZHANG SH L, et al. Precision measurement and application of laser interference [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 228-249.
- [4] SHI Y P, ZHOU Q, LI X H, et al. Design and testing of a linear encoder capable of measuring absolute distance[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 308: 111935.
- [5] 刘小康, 李昌伟, 彭凯, 等. 基于分时复用反射电极结构的高精度绝对式时栅角位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 23-31.
LIU X K, LI CH W, PENG K, et al. High precision absolute time-grating angular displacement sensor based on time-sharing multiplexing reflector electrode structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 23-31.
- [6] LIU X K, ZHAN B N, YU ZH CH, et al. A miniaturized capacitive absolute angular positioning sensor based on a dual two-stage secondary re-modulation scheme with time-division multiplexing [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 310: 112043.
- [7] JAIN V, LUTHRA N, CHAUDHARY G. Temperature invariant and high precision absolute rotary encoder using photocells on visible light spectrum [J]. International Journal of Information Technology, 2020, 12(4): 1403-1409.
- [8] TONG P, WU L, YANCHEN A, et al. A novel eddy current sensor for displacement measurement with high accuracy and long range [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(11): 12066-12075.
- [9] 杨继森, 修府, 张静, 等. 双频磁场分时激励的新型单列绝对式直线时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 308-322.
YANG J S, XIU F, ZHANG J, et al. A novel single-row absolute displacement sensor featuring dual-frequency magnetic field time-sharing excitation and linear time-grating displacement measurement [J]. Chinese Journal

- of Scientific Instrument, 2024, 45(9): 308-322.
- [10] 杨继森, 秦小东, 桂强, 等. 基于二次调制双通道同步的高分辨力绝对式时栅角位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 314-324.
- YANG J S, QIN X D, GUI Q, et al. High-resolution absolute time grating angular displacement sensor based on dual-channel synchronization of secondary modulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 314-324.
- [11] 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. A review of the development of grating precision displacement measurement technology[J]. China Optics, 2019, 12(4): 741-752.
- [12] BONOPERA M. Fiber-Bragg-grating-based displacement sensors: Review of recent advances [J]. Materials, 2022, 15(16): 5561.
- [13] HEIDENHAIN. Exposed linear encoders [EB/OL]. [2023-12-26].
- [14] BENDIGERI H H, KULKARNI V, JADHAV M S, et al. Biosynthesized CuO nanoparticles-coated grating sensors for temperature measurement[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(4): 045122.
- [15] TSAREV A. Design of the bimodal grating sensor with a built-in mode demultiplexer[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4327.
- [16] WU Y T, LONG X L, LU J Y, et al. Long-life in-situ temperature field monitoring using Fiber Bragg grating sensors in electromagnetic launch high-rate hardcase lithium-ion battery[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 1-9.
- [17] FU M, LI CH L, ZHU G, et al. A high precision time-grating displacement sensor based on temporal and spatial modulation of light-field [J]. Sensors, 2020, 20(3): 0921.
- 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): 9-11.
- WEI ZH J, ZHANG D, WU G H. Development of miniature optical grating sensors for precision displacement measurement [J]. Journal of Photonics, 2021, 50(9): 9-11.
- [19] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 时栅位移传感器原理与发展历程[J]. 重庆理工大学学报, 2010, 24(10): 40-45.
- PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, et al. Principle and development history of time-grating displacement sensor [J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2010, 24(10): 40-45.
- [20] 彭东林, 刘小康. 时栅传感器技术与超精密蜗轮副[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- PENG D L, LIU X K. Time-grating sensor technology and ultra-precision worm gear vice[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [21] 杨继森, 熊浩, 庞万章, 等. 时栅位移传感器在构造场中的耦合特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 249-259.
- YANG J S, XIONG H, TUO W ZH, et al. Study on the coupling characteristics of time-grating displacement sensors in the structural field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 249-259.
- [22] 杨继森, 熊浩, 文杰, 等. 基于气隙磁场分层耦合的直线时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 116-125.
- YANG J S, XIONG H, WEN J, et al. Based on the air-gap magnetic field layered coupling of linear grating displacement sensor research [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 116-125.
- [23] 彭东林. 时栅传感器的技术现状、发展趋势和思想延伸[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 128-134.
- PENG D L. Technological status, development trend, and thought extension of time grating sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 128-134.
- [24] 陈自然, 张桁潇, 刘小康, 等. 基于组合测量方式的新型磁场式时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 107-115.
- CHENG Z R, ZHANG H X, LIU X K, et al. Novel magnetic-field type time-grating displacement sensors based on a combined measurement method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 107-115.
- [25] 杨继森, 袁俊松, 修府, 等. 多频磁场耦合的绝对式直线时栅位移传感器研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5): 889-897.

YANG J S, YUAN J S, XIU F, et al. Study of absolute linear time-grid displacement sensor with multi-frequency magnetic field coupling[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5): 889-897.

- [26] 赵静, 汤其富, 彭松, 等. 互补谐振耦合型电磁式直线位移传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 6-11.
ZHAO J, TANG Q F, PENG S, et al. Inductive linear displacement sensor with complementary resonant coupling units [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(3):6-11.
- [27] 汤其富. 基于时变磁场精确约束方法的时栅位移传感器研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
TANG Q F. Study on time grating displacement sensor based on precise confine method of time-varying magnetic field[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

作者简介



杨继森(通信作者), 2001 年于湖北汽车工业学院获得学士学位, 2003 年于重庆大学获得硕士学位, 2007 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学教授, 主要研究方向为精密测量与智能传感器。

E-mail: yangjs@cqut.edu.cn

Yang Jisen (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hubei University of Automotive Technology in 2001, his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Chongqing University in 2003 and 2007, respectively. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision measurement and intelligence sensor.



易靖松, 2021 年于江西理工大学获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统与智能仪器。
E-mail: yijingsong@cqut.edu.cn

Yi Jingsong received his B. Sc. degree from Jiangxi University of Science and Technology in 2021. He is currently a master student in Chongqing University of Technology. His main research interests include embedded systems and intelligent instruments.



秦小东, 2022 年于重庆理工大学获得学士学位, 2025 年于重庆理工大学获得硕士学位, 现于重庆铁马工业集团有限公司任职, 主要研究方向为产品开发。
E-mail: Qinxd@stu.cqut.edu.cn

Qin Xiaodong received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Chongqing University of Technology in 2022 and 2025, respectively. Now he works for Chongqing Tiema Industrial Group Co., Ltd. His main research interest is product development.



张静, 2005 年于重庆理工大学获得学士学位, 2012 年于重庆大学获得硕士学位, 现为重庆理工大学讲师, 主要研究方向为电子信息技术与智能传感器。
E-mail: zjing@cqut.edu.cn

Zhang Jing received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Chongqing University of Technology in 2005 and 2012, respectively. She is currently a lecturer at Chongqing University of Technology. Her main research interests include electronic information technology and intelligent sensor.