

文章编号 1004-924X(2025)08-1212-16

基于球阵列的磁阻式时栅位移传感机理和 测量模型研究

陈自然^{1,2}, 秦莉莉^{1,2}, 王伟^{1,2}, 熊昕^{1,2*}, 刘振越^{1,2}, 郑永海^{1,2}

(1. 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;

2. 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘要:针对传统位移传感器无法兼顾大量程和高精度的测量难题,提出一种基于球阵列的磁阻式时栅位移测量新方法。利用空间正交激励绕组构建正交变化的磁场,通过空间周期性传感结构精确实现磁场约束控制。采用感应绕组拾取磁场变化,建立磁阻与位移的映射关系,揭示了位移传感机理。通过电磁仿真对模型参数进行优化,研制了传感器,搭建了实验平台,开展了传感器测量误差实验研究。实验结果表明,传感器在 512 mm 测量范围内,测量误差为 $\pm 9.4 \mu\text{m}$,分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ 。采用毫米级传感单元实现微米级测量精度,大大降低了传感器的制造难度,量程可按需扩展,无需借助细分技术实现高分辨率位移测量,可用于强油污等恶劣环境下位移测量,具有重要的学术价值和工程应用价值。

关键词:球阵列;时栅传感器;磁场约束;直线位移

中图分类号:TH822 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253308.1212 CSTR:32169.14.OPE.20253308.1212

Research on sensing mechanism and measurement model of magnetoresistive time-grating displacement based on spherical array

CHEN Ziran^{1,2}, QIN Lili^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, XIONG Xin^{1,2*}, LIU Zhenyue^{1,2}, ZHENG Yonghai^{1,2}

(1. *Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;*

2. *Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing 400054, China)*

* *Corresponding author, E-mail: xinxiong@cqut.edu.cn*

Abstract: Aiming at the problem that traditional displacement sensors do not balance both long range and high precision, a new displacement measurement method combining the time-grating principle with the magnetoresistive effect based on a spherical array was proposed. The orthogonally changing magnetic field was constructed by using spatial orthogonal excitation windings, and the magnetic field was accurately constraint-controlled by the spatial periodic sensing structure. The mapping relationship between magnetore-

收稿日期:2025-01-17;修订日期:2025-02-14.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2023YFB3209400);国家自然科学基金(No. 52175495, No. 52475549);重庆市自然科学基金创新发展联合基金(No. CSTB2023NSCQ-LZX0088)

sistance and displacement was established by using induction windings to pick up the change in the magnetic field, which revealed the displacement sensing mechanism. The model parameters were optimized by electromagnetic simulation, the sensor prototype was developed, the experimental platform was built, and the measurement error experiments of the sensor were conducted. The experimental results show that the sensor has a measurement error of $\pm 9.4 \mu\text{m}$ and a resolution of $0.1 \mu\text{m}$ within the 512 mm measurement range. Micrometer scale measurement accuracy is realized using the millimeter scale sensing unit, which greatly reduces the manufacturing difficulty of the sensor. Furthermore, the measurement range can be increased with the requirements of the applications, and its high resolution measurement can be achieved without the interpolation technology. It can be used in harsh environments such as strong oil pollution conditions, which promises the significant academic value and engineering application value.

Key words: spherical array; time-grating sensors; magnetic field constraint; linear displacement

1 引言

精密位移测量技术及器件是精密加工制造、国防军工、高端数控机床等领域的关键技术与核心部件^[1-3],其性能直接体现一个国家高端装备的发展水平。随着精密位移测量技术及仪器装备发展与迭代,要求位移传感器在复杂恶劣的测试环境中能同时兼顾“大量程”和“高精度”的特性^[4-6]。

目前主流位移传感器包括磁栅尺、光栅尺、容栅和球栅尺。磁栅尺以其抗干扰抗油污能力强的特点被广泛应用于大量程位移测量,但随着量程的增加,其测量分辨率和精度的局限性越发凸显。例如日本 Magnescale 公司生产的 SL110 磁栅尺在 2 000 mm 的测量范围内,最小测量误差为 $50 \mu\text{m}$,分辨力为 $10 \mu\text{m}$ ^[7]。光栅尺以微米/亚微米栅距作为测量基准,光路短,抗干扰性强,具有精度高等优势。德国 HEIDENHAIN 公司生产的 LIDA400 系列光栅尺栅距为 $20 \mu\text{m}$,通过拼接技术可实现在 3 040 mm 的测量范围内,精度为 $\pm 0.3 \mu\text{m}$,采用 100 倍细分,分辨力为 $0.2 \mu\text{m}$ 。但受到微纳加工工艺的限制,栅线的精密刻划精度和密度很难进一步提高,超大量程的高精度光刻对光栅传感器加工工艺和设备要求很高^[8-11],常需要通过细分方法实现在大量程范围内的分辨力测量^[12-13]。此外需要采取温度补偿来减小温度变化的影响^[14]。容栅测量精度高,但量程一般只有几十毫米。Moojin Kim 等研究基于周期电极阵列实现了

0.9 nm 分辨力和 390 nm 的测量精度,但测量范围仅为 15 mm^[15]。球栅^[16]采用全密封结构的钢球球距作为测量基准,通过单路激励电流,测头沿尺杆运动拾取电磁变化,采用鉴幅来检测位移,具有大量程、低成本、对温变不敏感等优势,但测量精度很难进一步提升。

针对上述问题,本研究充分利用球栅结构优势和本课题组原创的时栅技术^[17-18],开展基于球阵列的磁阻式时栅位移传感机理及测量模型研究,研究基于球阵列结构的磁场约束控制技术,利用空间正交激励绕组产生两路驻波信号,构建正交变化的磁场,采用感应绕组拾取磁场变化,建立磁阻与位移的映射关系。研制了传感器样机,搭建了实验台,开展了传感器测量误差实验、稳定性实验和分辨力实验研究。

2 传感器工作原理

2.1 位移传感结构

传感器整体结构如图 1(a)所示,主要包括定尺和动尺。动尺包含同轴的动尺基体、圆形激励绕组和圆形感应绕组。激励绕组和感应绕组分布在动尺基体上。定尺与动尺均为空心圆柱结构,动尺基体和定尺基体均由非导磁材料加工制作,定尺和动尺同轴安装,动尺套在定尺外,定尺包含定尺基体和紧密安装在基体内的磁性钢球阵列。

如图 1(b)所示,动尺包括圆形正弦绕组和圆形余弦绕组,圆形正弦绕组包括正弦激励绕组

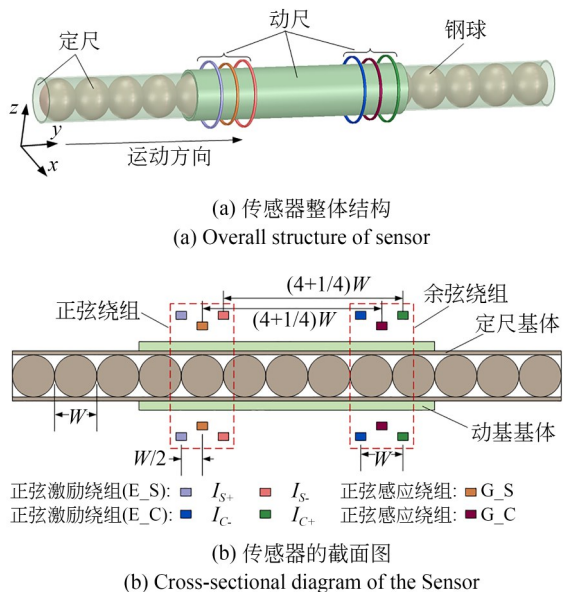
(E_S)和正弦感应绕组(G_S),圆形余弦绕组包括余弦激励绕组(E_C)和余弦感应绕组(G_C),正弦激励绕组(E_S)和余弦激励绕组(E_C)均由结构参数相同的多个圆形线圈构成。正弦激励绕组(E_S)通入正弦交流激励电流,余弦激励绕组(E_C)通入余弦交流激励电流,且激励绕组相邻线圈激励电流相位差为 180° ,如公式(1)所示,构成激励绕组对。

正弦激励绕组对和余弦激励绕组对分别均匀布置在不同的两个钢球外边沿,构成周期极距为 W 的对极,与钢球直径相等。动尺的感应绕组包括正弦感应绕组(G_S)和余弦感应绕组(G_C),结构参数也完全相同,分别排布在正弦激励绕组(E_S)和余弦激励绕组(E_C)的轴向中心位置。

正弦激励绕组(E_S)和余弦激励绕组(E_C)同轴,轴向间隔 $(M+1/4)W$ ($M=1,2,\dots,M$),其中 M 为正弦激励绕组(E_S)和余弦激励绕组(E_C)沿着轴向间隔的钢球数。正弦感应绕组(G_S)和余弦感应绕组(G_C)同轴,轴向间隔 $(M+1/4)W$ ($M=1,2,\dots,M$)。

2.2 位移传感

正弦激励绕组对和余弦激励绕组对的两



个激励线圈均是反向串联,对动尺上的正弦激励绕组(E_S)和余弦激励绕组(E_C)分别施加两路同频率等幅值的正弦激励电流和余弦激励电流,如图 1(b)所示。激励电流如式(1)所示,其中 I_m 为交变电流最大幅值, ω 为交变电流频率:

$$\begin{cases} I_{S+} = I_m \sin(\omega t) \\ I_{S-} = -I_m \sin(\omega t) \\ I_{C+} = I_m \cos(\omega t) \\ I_{C-} = -I_m \cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

对于正弦激励绕组(E_S)中通入激励电流 I_{S+} 的绕组,磁路回路可列式为:

$$\frac{B_{s+_{\text{air}}}}{\mu_0} l_{s+_{\text{air}}} + \frac{B_{s+_{\text{ball}}}}{\mu_{\text{ball}}} l_{s+_{\text{ball}}} = N_1 I_{S+}, \quad (2)$$

其中: $B_{s+_{\text{air}}}$, $B_{s+_{\text{ball}}}$ 分别表示气隙和钢球的磁感应强度, $l_{s+_{\text{air}}}$, $l_{s+_{\text{ball}}}$ 则分别表示磁路通过空气、钢球的有效长度, N_1 为激励线圈匝数。若磁路通过气隙和钢球的有效长度可以近似为一个球距,由于钢球磁导率远大于气隙,因此忽略其磁阻,则气隙处的磁感应强度为:

$$B_{s+_{\text{air}}} = \frac{\mu_0 N_1 I_{S+}}{W} = k I_{S+}, \quad (3)$$

其中, $k = \mu_0 N_1 / W$ 。同理,通入激励电流 I_{S-} 的绕组,在空气处产生的磁感应强度为:

$$B_{s-_{\text{air}}} = \frac{\mu_0 N_1 I_{S-}}{W} = k I_{S-}. \quad (4)$$

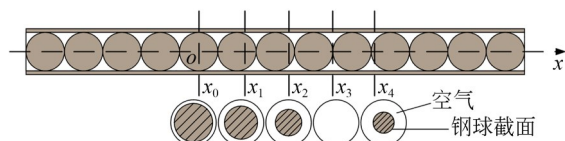
定尺是采用高磁导率的磁性钢球,因此在时变磁场中,磁场主要沿着钢球的轴向分布,如图 2 所示,钢球截面的周期性变化对应着磁阻随位置 x 周期性地变化,从模型中可知,当动尺相对定尺运动时,感应绕组经过的钢球截面积发生周期变化,导致磁阻也发生周期性变化,感应绕组处磁导率由气隙和钢球的磁导率共同决定。

若以图 2 中 O 点为正弦路感应绕组所在截面的起始位置,动子沿着定子产生相对运动且位移量为 x ,磁性钢球半径为 r ,则在一个周期内钢球截面积的变化为:

$$S_{\text{ball}} = \pi(2r|x| - x^2), x \in (-r, r). \quad (5)$$

设感应绕组半径为 R ,可得正弦绕组中感应绕组所在截面气隙的变化为:

$$S_{\text{air}} = \pi(R^2 - 2r|x| + x^2), x \in (-r, r). \quad (6)$$

图 2 感应绕组处的磁介质随位移 x 的变化Fig. 2 Variation of magnetic medium at induction windings with displacement x

式(6)属于偶函数。因此,根据傅里叶级数,展开为:

$$S_{\text{air}} = \pi R^2 - \frac{2\pi r^2}{3} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{4r^2}{\pi n^2} \cos\left(\frac{n\pi x}{r}\right) = G_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} G_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{W}\right), (n=1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

其中: $G_0 = \pi R^2 - 2\pi r^2/3$, $G_n = 4r^2/\pi n^2$, 极距为 W 。

则余弦绕组中感应绕组所在截面气隙的变化为:

$$S_{\text{air}_W} = G_0 - \sum_{n=1}^{+\infty} G_n \sin\left(\frac{2n\pi x}{W}\right), (n=1, 2, \dots, n). \quad (8)$$

则正弦绕组中感应绕组相对定尺运动时,内部的磁通量变化为:

$$\Phi_s(t, x) = 2kI_m \sin(\omega t) \left[G_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} G_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{W}\right) \right]. \quad (9)$$

则在正弦路得到驻波信号为:

$$U_s(t, x) = KI_m \cos(\omega t) \left[G_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} G_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{W}\right) \right], \quad (10)$$

其中: $K = -2N_2 k\omega$, N_2 为感应线圈匝数。

同理,余弦绕组中激励绕组通入余弦激励电流 I_{c+} 时,在余弦路得到的驻波信号为:

$$U_c(t, x) = -KI_m \sin(\omega t) \left[G_0 - \sum_{n=1}^{+\infty} G_n \sin\left(\frac{2n\pi x}{W}\right) \right]. \quad (11)$$

将正弦感应绕组(G_S)与余弦感应绕组(G_C)同向串联,两路驻波信号 U_s, U_c 叠加得到行波信号为:

$$U(t, x) = M_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} M_n \cos\left(\omega t - \frac{2n\pi x}{W}\right), \quad (12)$$

其中: $M_0 = -\sqrt{2} KG_0 I_m \sin(\omega t - \pi/4)$, $M_n =$

$KI_m G_n$ 。

由于气隙磁导中基波幅值远大于高次谐波幅值,位移测量主要由基波决定,直流分量在后续位移测量系统中会被补偿,因此,式(12)可近似简化为:

$$U(t, x) = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{W}\right), \quad (13)$$

其中, $A = KI_m 4r^2/\pi$ 。

利用正弦感应绕组(G_S)、余弦感应绕组(G_C)拾取正交时变磁场,得到两路驻波信号,将两路驻波信号合成行波信号,将被测位移信息调制到行波信号的相位,相位变化反映了动尺相对于定尺的位置变化,通过相位解调,建立了位移信号与时间基准之间的关系。其优势在于结合球栅尺的钢球均匀排列且密封特性,实现磁场精确约束控制,利用时间尺度提高空间尺度的测量精度和分辨力,显著降低了传统位移传感器测量精度严重依赖高精度空间等分刻划的弊端。

2.3 位移解耦方法

如图3所示为基于球阵列的磁阻式时栅位移传感器位移测量原理图,其中激励信号 $i_{s+}, i_{s-}, i_{c+}, i_{c-}$ 由FPGA正弦信号表生成,通过D/A转换、带通滤波和功率放大后将激励信号通入正弦激励绕组(E_S)和余弦激励绕组(E_C)。

当激励绕组通入激励电流,基于电磁感应原理,产生周期性变化的时变磁场,利用球对称的结构特性,当动尺沿着定尺产生相对运动时,钢球截面周期性变化,定尺内磁力线穿过磁性钢球和气隙形成的磁路磁阻发生周期性变化,则位于各组激励绕组中间的感应绕组产生周期性变化的感应电动势,变化周期为一个极距 W 。正弦感应绕组(G_S)和余弦感应绕组(G_C)分别输出在时间与空间上均正交的驻波信号 U_s, U_c , 将两路驻波信号叠加得到相位随运动位移发生周期性变化的位移行波信号 U 。将其通入FPGA芯片与同频率、等幅值、相位固定的参考信号 U_{ref} 进行比相得到相位差 ΔT , 采用高频时钟信号对相位差插补得到动尺相对定尺运动的位移测量值,如

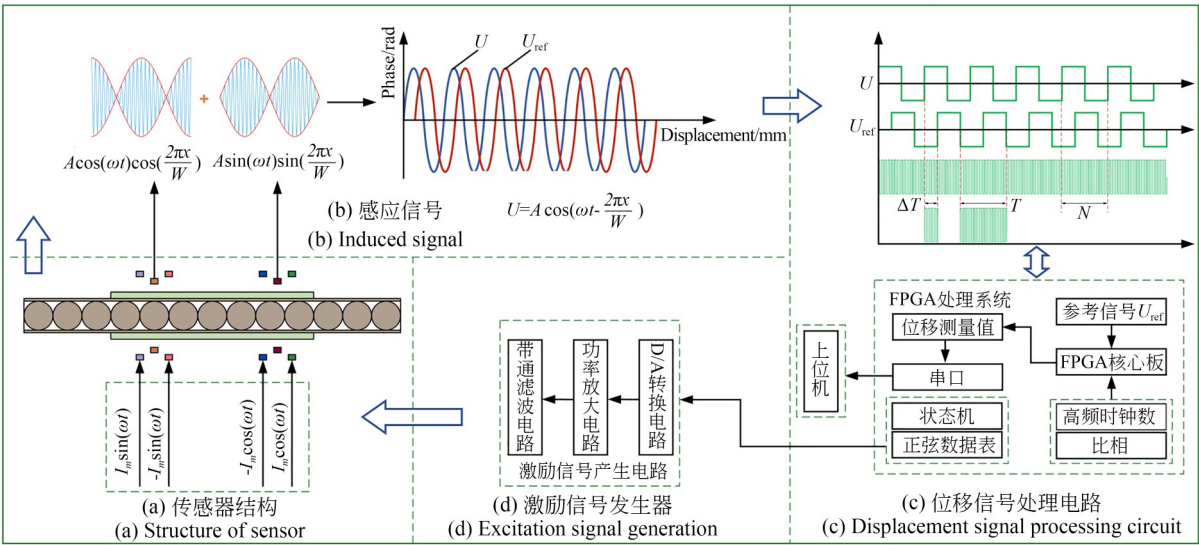


图 3 传感器位移测量原理图

Fig. 3 Schematic diagram of sensor displacement measurement

式(14)所示:

$$\Delta x = \left(N + \frac{\Delta T}{T} \right) W, \tag{14}$$

其中: N 为比相周期整数, W 为单个对极空间位移, ΔT 为不足一个周期时,采用比相测得的相位差对应的时间量, T 为参考信号的周期。 ΔT 和 T 均通过高频时钟脉冲插补计数得出,如式(15)所示:

$$\begin{cases} T = \frac{1}{f_e} \\ \Delta T = \Sigma P_i / f_p \end{cases}, \tag{15}$$

其中: ΣP_i 为不足一个周期时,通过高频时钟脉冲插补的脉冲个数, f_e 为激励信号频率, f_p 为高频时钟脉冲插补信号频率。

当插补脉冲数值 ΣP_i 增加 1 时,相应的最小位移增量即为分辨力,因此,将公式(15)代入公式(14)可得分辨力的表达式,如式(16)所示:

$$\delta = W \times \frac{f_e}{f_p}. \tag{16}$$

3 建模仿真与数据分析

3.1 建模仿真

为验证所建立的基于球阵列的磁阻式时栅位移传感器模型的合理性及正确性,利用有限元分析软件对传感器模型进行仿真分析。设置传

感器仿真模型参数如表 1 所示。

表 1 模型仿真参数
Tab. 1 Model simulation parameters

模型仿真参数	参数值
激励信号幅值/A	0.1
激励信号频率/kHz	10
激励绕组半径/mm	12
激励绕组匝数	5
感应绕组半径/mm	11
感应绕组匝数	5
线圈材料	Copper
定尺基体材料	PVC plastic
钢球材料	Steel_1008
动尺基体材料	PVC plastic
传感器极距(W)/mm	16
步距/mm	0.5
激励/感应绕组厚度/mm	1

仿真极距 $W=16\text{ mm}$,动尺相对定尺运动一个极距时,对应感应信号变化一个周期。设置动尺运动步距为 0.5 mm ,即动尺相对定尺运动的 32 个不同位置进行仿真,感应绕组感应电动势变化曲线仿真计算如图 4 所示,动尺感应位置信息与三十三个位置的电动势变化曲线一一对应,相位均匀变化。

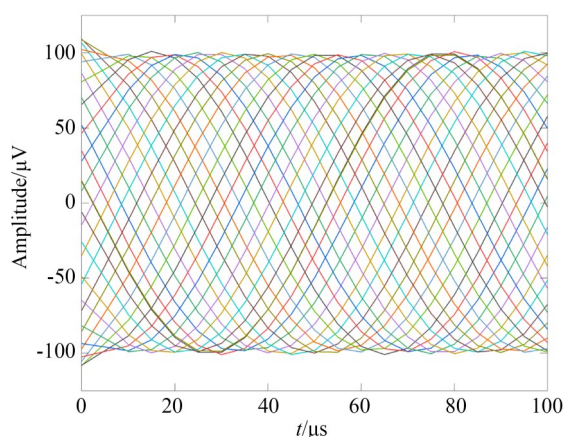


图4 动尺在不同位置的信号输出

Fig. 4 Signal output of the moving ruler at different spatial positions

3.2 数据分析

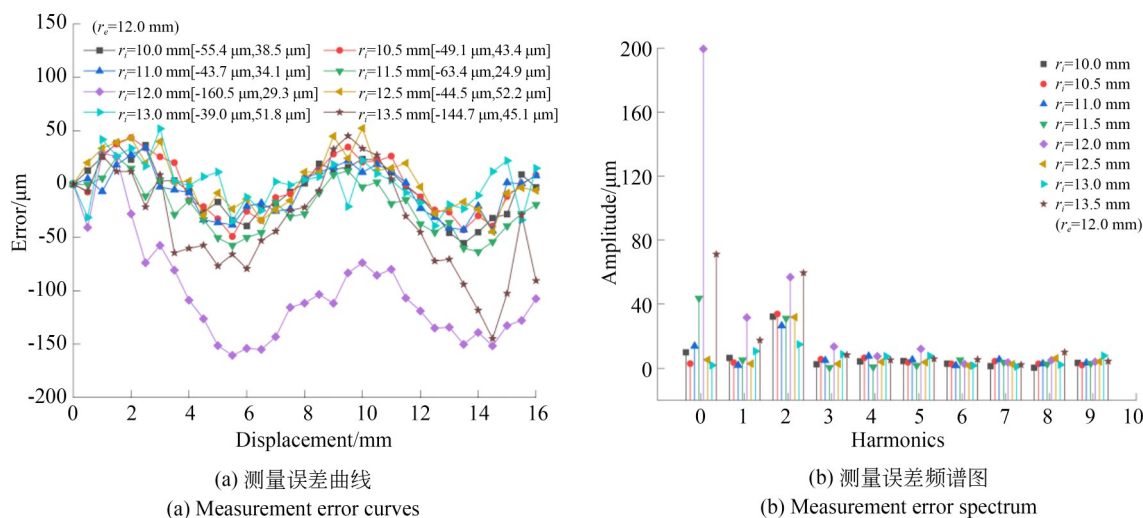
正弦感应绕组(G_S)和余弦感应绕组(G_C)分别输出两路驻波信号,将两路驻波信号叠加输出行波信号,行波信号的初相位对应每个位移测量值,表现为感应绕组运动到不同的空间位置。理论上,行波两两相邻的相位差是相等的,实际上,仿真结果中两相邻测量曲线之间相差的相位差并非完全相等,将不同空间位置对应的初相位与理论值相减,可得感应绕组的运动位移测量误差。

通过前期的电磁仿真和数值计算,激励绕组和感应绕组的尺寸参数会直接决定磁场的耦合

程度,导致磁场强度的非线性,严重影响测量精度。因此首先需讨论分析动尺中不同半径的激励绕组和感应绕组对测量误差的影响。记激励绕组半径为 r_e ,感应绕组半径为 r_i ,采用控制变量法进行分析。图5~图7详细分析了3组不同半径的激励绕组与8组不同半径感应绕组,以0.5 mm气隙高度为步距,对传感器测量误差影响的仿真实验。

当激励绕组半径 $r_e=12.0$ mm时,从10.0~13.5 mm设计了8组不同半径感应绕组,进行不同半径感应绕组对传感器测量误差影响的仿真实验。在一个对极内,对行波仿真数据处理所得误差曲线如图5(a)所示,对误差数据进行快速傅里叶变换得到误差频谱图如图5(b)所示。测量误差曲线主要成分包含直流分量、1次谐波和2次谐波, $r_i=r_e=12.0$ mm时,测量误差最大,峰峰值为189.8 μm , $r_i=11.0$ mm时,测量误差最小,峰峰值为77.8 μm ,当 $r_i=13.0$ mm时,测量误差峰峰值为90.8 μm 。

当激励绕组半径 $r_e=12.5$ mm时,从10.5~14.0 mm设计了8组不同半径感应绕组,进行不同半径感应绕组对传感器测量误差影响的仿真实验。同理,对行波仿真数据处理所得误差曲线如图6(a)所示,对误差数据进行快速傅里叶变换得到误差频谱图如图6(b)所示。测量误差曲线主要成分包含直流分量、1次谐波和2次谐波,

图5 $r_e=12.0$ mm时,不同半径 r_i 的感应绕组测量误差及其误差频谱图Fig. 5 Measurement errors and error spectrum with the conditions $r_e=12.0$ mm and different r_i

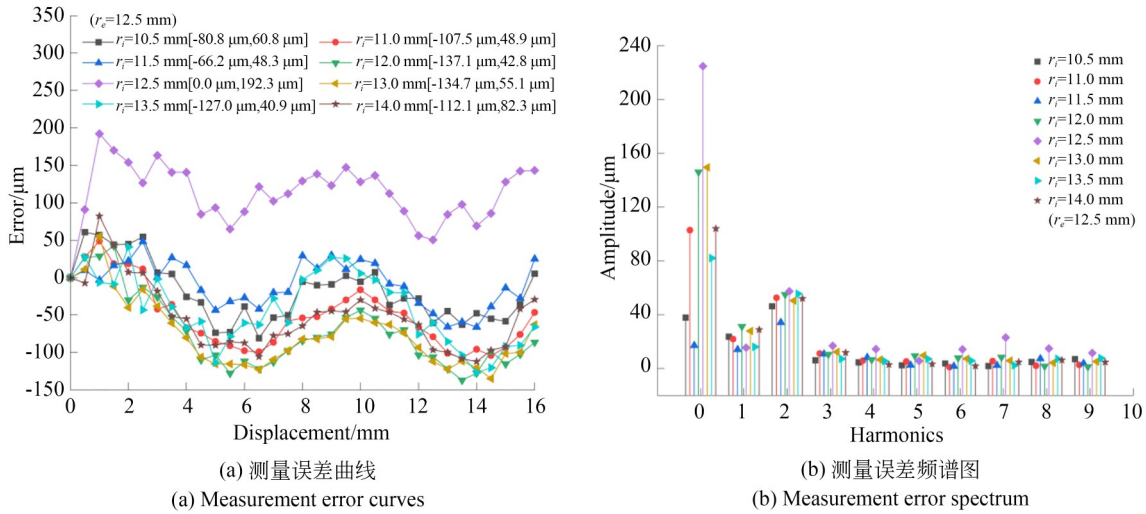


图 6 $r_e = 12.5 \text{ mm}$ 时, 不同半径 r_i 的感应绕组测量误差及其误差频谱图

Fig. 6 Measurement errors and error spectrum with the conditions $r_e = 12.5 \text{ mm}$ and different r_i

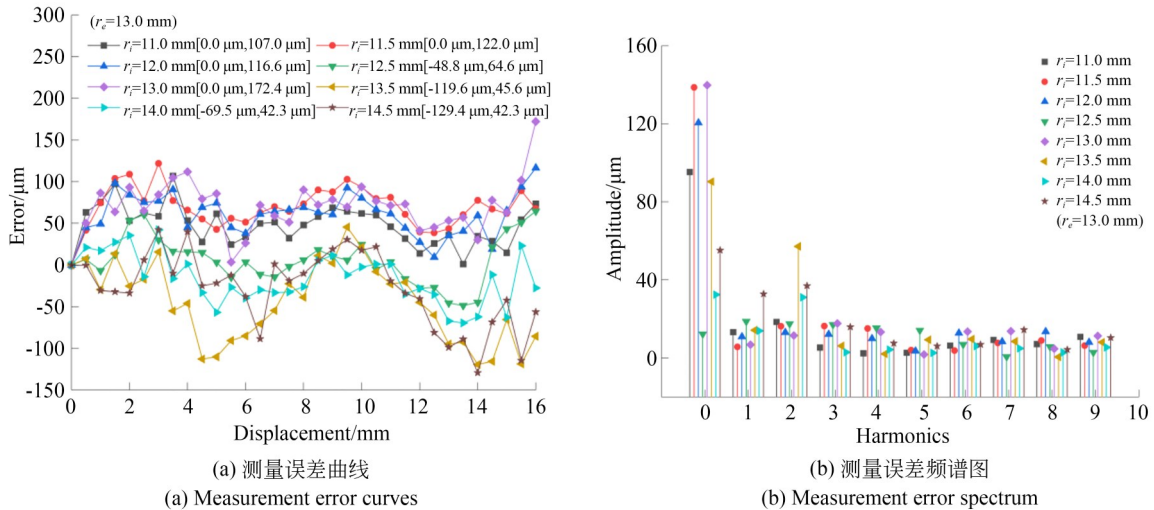


图 7 $r_e = 13.0 \text{ mm}$ 时, 不同半径 r_i 的感应绕组测量误差及其误差频谱图

Fig. 7 Measurement errors and error spectrum with the conditions $r_e = 13.0 \text{ mm}$ and different r_i

$r_i = r_e = 12.5 \text{ mm}$ 时, 测量误差最大, 峰峰值为 $192.3 \mu\text{m}$, $r_i = 11.5 \text{ mm}$ 时, 测量误差最小, 峰峰值为 $114.5 \mu\text{m}$, 当 $r_i = 13.5 \text{ mm}$ 时, 测量误差峰峰值为 $167.9 \mu\text{m}$ 。

当激励绕组半径 $r_e = 13.0 \text{ mm}$ 时, 从 $11.0 \sim 14.5 \text{ mm}$ 设计了 8 组不同半径感应绕组, 进行不同半径感应绕组对传感器测量误差影响的仿真实验。同理, 对行波仿真数据处理所得误差曲线如图 7(a) 所示, 对误差数据进行快速傅里叶变换得到误差频谱图如图 7(b) 所示。测量误差曲线主要成分包含直流分量、1 次谐波和 2 次谐波,

$r_i = r_e = 13.0 \text{ mm}$ 时, 测量误差最大, 峰峰值为 $172.4 \mu\text{m}$, $r_i = 11.0 \text{ mm}$ 时, 测量误差最小, 峰峰值为 $107.0 \mu\text{m}$, 当 $r_i = 14.0 \text{ mm}$ 时, 测量误差峰峰值为 $111.8 \mu\text{m}$ 。

综合分析 3 组不同半径的激励绕组与 8 组不同半径感应绕组对测量误差的影响, 分析结果表明:

(1) 在不同半径的激励绕组条件下, 在对极内不同半径感应绕组对应的测量误差频谱主要成分相同, 均包含直流分量、1 次谐波和 2 次谐波;

(2) 正弦激励绕组对和余弦激励绕组对均有

2个相同尺寸的线圈构成,通入激励电流相位相反,通过两路驻波构建正交时变磁场,由于磁场的边界效应,导致正交时变磁场非均匀产生了2次谐波;

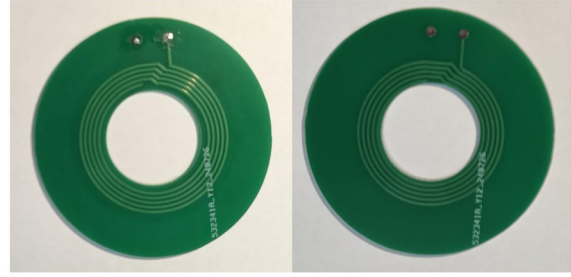
(3)在各个不同半径的激励绕组下,综合比较,当 $r_i=r_e$ 时,测量误差与各谐波频次相较于 $r_i>r_e$ 或 $r_i<r_e$ 时较大,直流分量与2次谐波幅值较大。当 $r_i>r_e$ 时或 $r_i<r_e$ 时,随着半径的逐渐增大或减小,直流分量、2次谐波和3次谐波都有明显幅度的减小,究其原因在于当激励绕组与感应绕组的半径距离较近时,容易产生串扰进而产生较大的直流影响。且当激励绕组半径逐渐增加时,直流分量幅值明显增加;

(4)通过电磁仿真实验分析, $r_i=r_e$ 时,测量误差最大,此外,感应绕组与激励绕组的半径差大于1 mm时,会造成较大测量误差,当 $r_e=12.5$ mm, $r_i=14.0$ mm时,测量误差峰峰值达到194.4 μm ,半径差在0~0.5 mm范围内也会造成较大测量误差,当 $r_e=12.5$ mm, $r_i=13.0$ mm时,测量误差峰峰值为189.8 μm 。综合比较,感应绕组半径小于激励绕组半径时测量效果较好,当 $r_e=12.0$ mm, $r_i=11$ mm时,误差峰峰值最小,为77.8 μm ,因此,综合考虑传感器样机安装、感应信号幅值、测量误差等因素,优化激励绕组半径 r_e 为12.0 mm,感应绕组半径 r_i 为11 mm进行样机制作。

4 实验验证及误差分析

4.1 实验平台搭建

为验证仿真模型与测量方法的可行性,利用印制电路板PCB工艺加工并制作了传感器样机。印制电路板的圆形正弦激励绕组(E_S)和圆形余弦激励绕组(E_C)均反向串联,圆形正弦感应绕组和圆形余弦感应绕组是同向串联,正弦激励绕组(E_S)及其感应绕组相对于余弦绕组及其感应绕组间隔68 mm,即 $(4+1/4)W$ 。线圈宽度为0.5 mm。PCB加工的样机半径为26 mm,如图8所示。传感器定尺基体采用非磁性不锈钢管材内套高精度磁性钢球。实验选用了符合GB/T 308.1-2013标准的G16级标准钢球,其关键参数如下:表面粗糙度 $R_a \leq 0.025$ μm ,球形误差 $\Delta_{Rsw} \leq 0.4$ μm ,球直径变动量 $V_{Dws} \leq 0.4$ μm ,球批直径变动量 $V_{Dwl} \leq 0.8$ μm 。采用铝合金材料制作



(a) 激励绕组 (b) 感应绕组
(a) Excitation windings (b) Induction windings

图8 传感器样机的激励绕组与感应绕组

Fig. 8 Excitation windings and induction windings of sensor prototype

了120 mm×80 mm×66 mm动尺外壳,将动尺外壳、动尺基体、激励绕组和感应绕组一体化组装。

搭建如图9所示实验平台,其中,①Keysight示波器,②激光干涉仪上位机,③上位机测试系统,④AEROTECH直线电机控制系统,⑤Renishaw激光干涉仪XL-80,⑥直线电机,⑦传感器样机,⑧信号处理电路板,⑨电源模块,⑩信号传输串口。直线电机采用美国AEROTECH公司制造的直线电机模组PRO190LM-0500-TT1-E3-CMS1-LF-PL2-TAS,配置高性能驱动器BLMC-192-A,系统重复精度为 ± 0.5 μm ,系统整体定位精度 ± 1 μm ,分辨力为10 nm。

传感器动尺通过预留连接件与直线电机连接,连接件一端安装在直线电机上,另一端通过螺纹孔与动尺外壳相连接,动尺通过连接件随直



图9 实验台

Fig. 9 Experiment platform

线电机沿导轨做直线运动。运动过程中,动尺上正弦感应绕组和余弦感应绕组通过钢球磁阻周期性变化感应空间时变磁场得到两路驻波信号,

将两路驻波信号叠加得到行波信号,即动尺相对定尺运动的位移信号。经过放大、滤波、整形形成方波信号后,与参考信号 U_r 比相,采用高频时钟脉冲累加计数得到运动位移量。实验采用 RenishawXL-80 激光干涉仪作为实验测量基准标定

传感器,测量精度为 $\pm 0.5 \text{ ppm}$,以激光干涉仪测量数据与传感器测量数据作差得到原始测量误差。对原始测量误差进行傅里叶变换得到误差谐波分量的幅值与相位,通过谐波修正法对误差进行修正^[19-20],如图 10 所示。

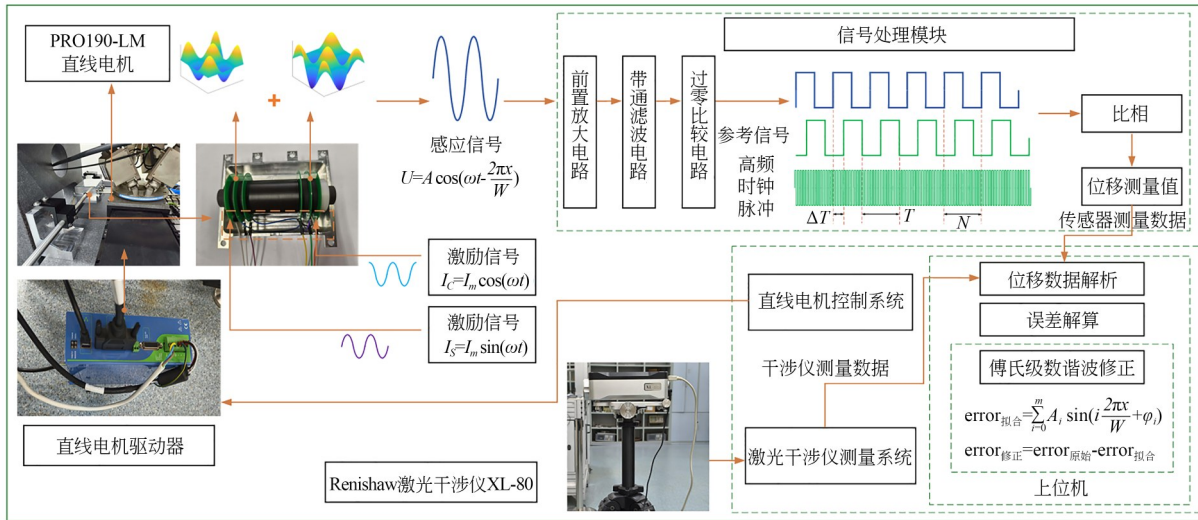


图 10 实验台结构图

Fig. 10 Structure diagram of the experimental platform

4.2 线圈尺寸参数优化验证实验

按照仿真的线圈尺寸加工了 3 套不同尺寸的激励线圈和 9 套不同尺寸的感应线圈。当激励绕组半径 r_e 分别为 12.0 mm、12.5 mm 和 13.0 mm 时,分别开展相对应不同半径感应绕组的测量误差

差实验。即在激励绕组半径 $r_e = 12.0 \text{ mm}$ 的条件下,感应半径 r_i 分别为 10.0 mm、11.0 mm、12.0 mm 和 13.0 mm 的不同半径感应绕组对传感器测量误差影响的实验。通过采集运动位移数据,得到如图 11(a)所示测量误差曲线,对实验数据

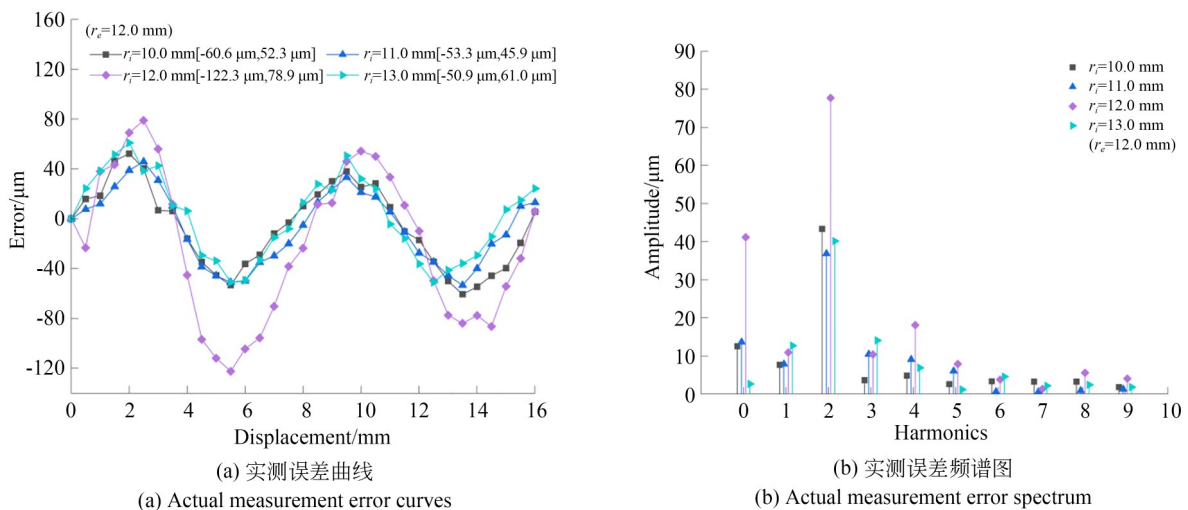


图 11 $r_e = 12.0 \text{ mm}$ 时,不同半径 r_i 的感应绕组实测误差及其误差频谱图

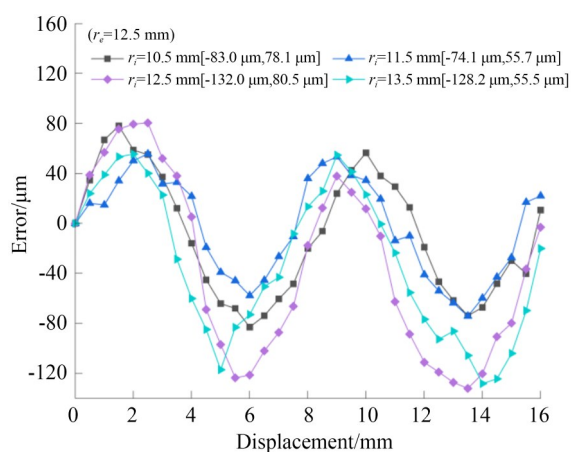
Fig. 11 Actual measurement errors and error spectrum with the conditions $r_e = 12.0 \text{ mm}$ and different r_i

采用傅里叶变换进行计算分析,得到如图11(b)所示误差频谱图。误差曲线主要成分包含直流分量、1次谐波和2次谐波,当 $r_e=12.0\text{ mm}$, $r_i=11.0\text{ mm}$ 时,测量误差最小,峰峰值为 $99.2\text{ }\mu\text{m}$, $r_i=r_e=12.0\text{ mm}$ 时,测量误差最大,峰峰值为 $201.2\text{ }\mu\text{m}$,与仿真分析基本一致。

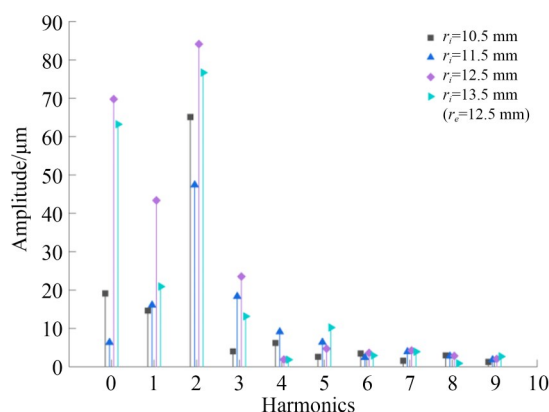
同理,在激励绕组半径 $r_e=12.5\text{ mm}$ 的条件下,开展感应半径 r_i 分别为 10.5 mm , 11.5 mm , 12.5 mm 和 13.5 mm 时对传感器测量误差影响的实验,得到如图12(a)所示测量误差曲线和如图12(b)所示误差频谱图。误差曲线主要成分包

含直流分量、1次谐波和2次谐波,当 $r_e=12.5\text{ mm}$, $r_i=11.5\text{ mm}$ 时,测量误差最小,峰峰值为 $129.8\text{ }\mu\text{m}$, $r_i=r_e=12.5\text{ mm}$ 时,测量误差最大,峰峰值为 $212.5\text{ }\mu\text{m}$,与仿真分析基本一致。

在激励绕组半径 $r_e=13.0\text{ mm}$ 的条件下,开展感应半径 r_i 分别为 11.0 mm , 12.0 mm , 13.0 mm 和 14.0 mm 时对传感器测量误差影响的实验,得到如图13(a)所示测量误差曲线和如图13(b)所示误差频谱图。误差曲线主要成分包含直流分量、1次谐波和2次谐波,当 $r_e=13.0\text{ mm}$, $r_i=12.0\text{ mm}$ 时,测量误差最小,峰峰值为 $127.5\text{ }\mu\text{m}$



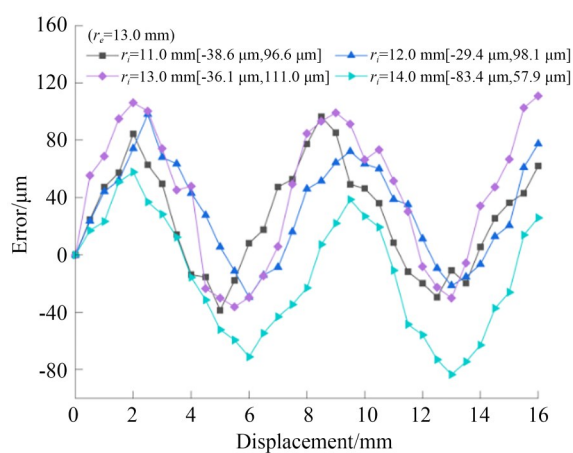
(a) 实测误差曲线
(a) Actual measurement error curves



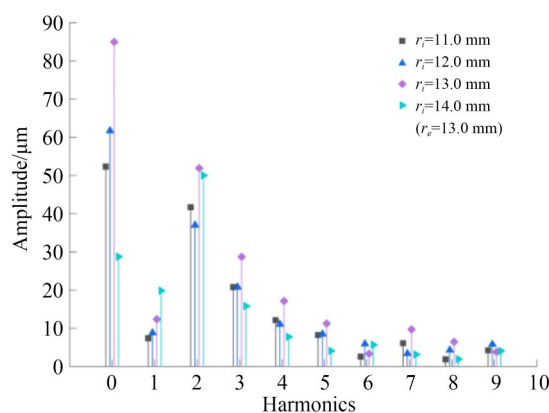
(b) 实测误差频谱图
(b) Actual measurement error spectrum

图12 $r_e=12.5\text{ mm}$ 时,不同半径 r_i 的感应绕组实测误差及其误差频谱图

Fig. 12 Actual measurement errors and error spectrum with the conditions $r_e=12.5\text{ mm}$ and different r_i



(a) 实测误差曲线
(a) Actual measurement error curves



(b) 实测误差频谱图
(b) Actual measurement error spectrum

图13 $r_e=13.0\text{ mm}$,不同半径 r_i 的感应绕组实测误差及其误差频谱图

Fig. 13 Actual measurement errors and error spectrum with the conditions $r_e=13.0\text{ mm}$ and different r_i

μm , $r_i=r_e=13.0\text{ mm}$ 时, 测量误差最大, 峰峰值为 $147.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

实验数据表明:

(1) 在不同半径的激励绕组条件下, 对极内不同半径感应绕组对应的误差测量曲线主要包括直流分量、1 次谐波和 2 次谐波;

(2) 当 $r_e=r_i$ 时, 测量误差最大, 由于线圈之间串扰的影响, 产生较大的直流分量, 且随着激励绕组半径的增加, 直流分量幅值明显增大, $r_i=r_e=12.5\text{ mm}$ 时, 峰峰值可达 $212.5\text{ }\mu\text{m}$, $r_e=13.0\text{ mm}$ 时, 直流分量幅值最大。相较于 $r_e=r_i$ 时, $r_i<r_e$ 或 $r_i>r_e$ 时, 测量误差明显减小, 直流分量、1 次谐波、2 次谐波、3 次谐波和 4 次谐波的幅值明显下降, 当 $r_i<r_e$ 时, 测量效果更好, $r_e=12.0\text{ mm}$,

$r_i=11.0\text{ mm}$ 时, 测量误差最小, 峰峰值为 $99.2\text{ }\mu\text{m}$ 。综合比较, 当 $r_i<r_e$ 时, 激励绕组与感应绕组的半径差为 1 时, 测量效果较好, 与仿真分析基本一致。因此, 在实验中采用激励绕组半径 $r_e=12.0\text{ mm}$, 感应绕组半径 $r_i=11.0\text{ mm}$ 时较合理, 测量误差为 $-53.3\sim 45.9\text{ }\mu\text{m}$;

(3) 与仿真结果相比, 2 次谐波误差和 4 次谐波误差幅值明显增加, 主要原因在于正弦激励信号和余弦激励信号幅值不等, 以及正弦绕组和余弦绕组制造误差引起的并非严格空间正交所造成的。3 次谐波误差主要由于传感器制造、安装使动尺与定尺存在安装偏心引起的。整体比较, 随着激励半径的逐渐增加, 各主要谐波幅值明显增大。

表 2 线圈尺寸参数优化

Tab. 2 Optimization of coils size parameters

激励绕组 半径/mm	感应绕组 半径/mm	主要谐波分量与幅值/ μm									
		直流分量	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次	7 次	8 次	9 次
$r_e=12.0$	$r_i=10.0$	12.54	7.67	43.34	3.63	4.84	2.61	3.36	3.27	3.28	1.84
	$r_i=11.0$	13.65	7.89	36.85	10.46	9.09	6.07	0.59	0.61	0.91	1.29
	$r_i=12.0$	41.15	10.91	77.70	10.43	18.09	7.87	3.80	1.32	5.60	4.07
	$r_i=13.0$	2.66	12.72	40.17	14.10	6.92	1.21	4.60	2.17	2.43	1.83
$r_e=12.5$	$r_i=10.5$	19.10	14.61	65.08	3.98	6.17	2.58	3.43	1.55	2.94	1.23
	$r_i=11.5$	6.34	16.05	47.40	18.31	9.11	6.39	2.39	3.89	2.76	1.81
	$r_i=12.5$	69.78	43.34	84.12	23.51	1.89	4.68	3.60	4.23	2.81	2.03
	$r_i=13.5$	63.21	20.91	76.67	13.12	1.84	10.22	2.90	3.89	0.87	2.67
$r_e=13.0$	$r_i=11.0$	52.30	7.36	41.70	20.77	12.11	8.22	2.55	6.08	1.85	4.18
	$r_i=12.0$	61.69	8.77	36.95	20.81	11.04	8.46	5.93	3.38	4.30	5.78
	$r_i=13.0$	84.98	12.37	51.90	28.68	17.10	11.24	3.32	9.66	6.43	3.82
	$r_i=14.0$	28.74	19.83	49.99	15.79	7.73	4.07	5.65	3.14	1.90	4.07

4.3 稳定性实验

以激励绕组半径 $r_e=12.0\text{ mm}$, 感应绕组半径 $r_i=11.0\text{ mm}$ 时进行稳定性实验, 通过直线电机带动动尺运动到 80 mm 的定点位置后, 每隔 2 s 采集一次上位机数据, 共采集 250 个数据。其结果如图 14 所示, 实验结果表明, 传感器稳定性波动在 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 范围内。

4.4 对极内测量误差实验

激励绕组半径 $r_e=12.0\text{ mm}$, 感应绕组半径 $r_i=11.0\text{ mm}$ 时, 测量误差曲线如图 15 所示, 通过傅里叶变换分析, 其误差频谱图如图 16 所示。误差主要谐波成分包含直流分量、2 次谐波、3 次谐波和 4 次谐波, 其中, 2 次谐波误差最大。正弦激励信号和余弦激励信号幅值不等、空间不正交都会造成

2次谐波误差。其次钢球的尺寸误差如有2次谐波误差,也会造成测量误差中包含2次谐波误差。

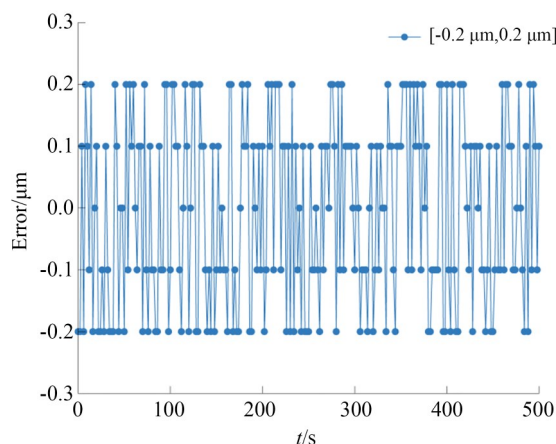


图14 传感器稳定性误差曲线

Fig. 14 Stability error curve of sensor

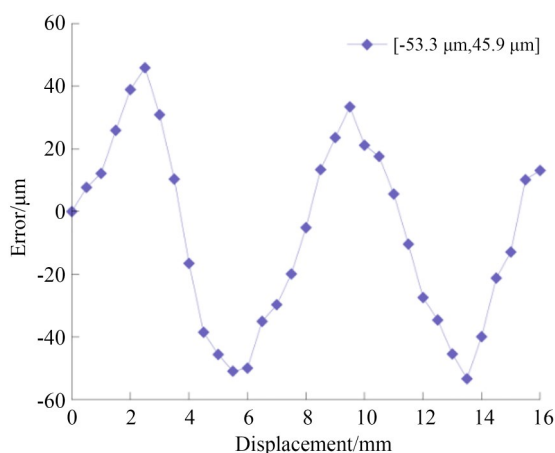


图15 对极内测量误差曲线

Fig. 15 Measurement error curve within a pitch

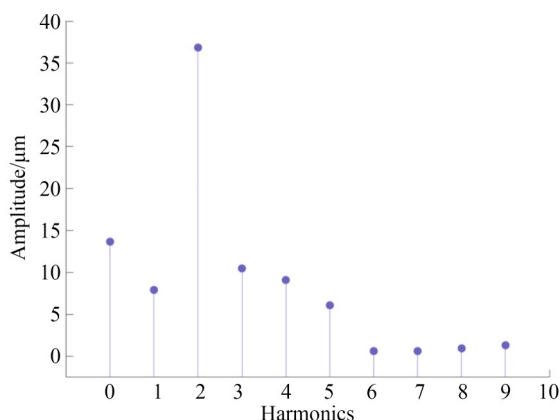


图16 对极内测量误差频谱

Fig. 16 Measurement error spectrum within a pitch

4.5 重复性实验

在相同的条件下,开展对极内重复性实验,以0.5 mm为移动步距,动尺相对于定尺移动一个对极,重复2次,将测量值与激光干涉仪测量数据作差得到如图17所示重复性实验结果。

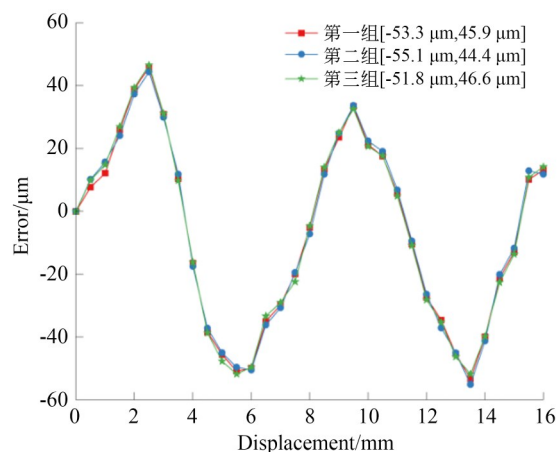


图17 对极内重复性实验误差

Fig. 17 Experimental error of repeatability within a pitch

对极内传感器的重复性误差可计算为:

$$\xi_R = \frac{\Delta\gamma_R}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{3.5}{16\,000} \times 100\% = 0.022\%, \quad (17)$$

其中: ξ_R 为重复性误差, $\Delta\gamma_R$ 为多次测量值的最大差值, Y_{FS} 为输出的满量程值。

4.6 全量程测量误差实验

通过直线电机同步带动动尺相对于定尺以0.5 mm步距沿轴向运动512 mm,以1.6 GHz高频时钟脉冲插补信号频率对传感器相位差插补得到位移测量值,将数据与激光干涉仪测量数据比对得到大量程测量误差,如图18所示。对测量误差数据进行傅里叶变换得到的误差频谱分析图如图19所示,其主要谐波分量如表3所示。分析实验数据可知,测量误差的谐波成分主要包含直流分量、32次谐波、64次谐波和128次谐波,其中64次谐波误差是最大的谐波误差,直流分量误差、64次和128次谐波误差产生的主要原因:由于不同尺寸的激励绕组在构建时变磁场时,磁场强度呈现非线性分布,这导致感应绕组所拾取的两路驻波信号发生畸变,以及由于正弦激励信号和余弦激励信号幅值不

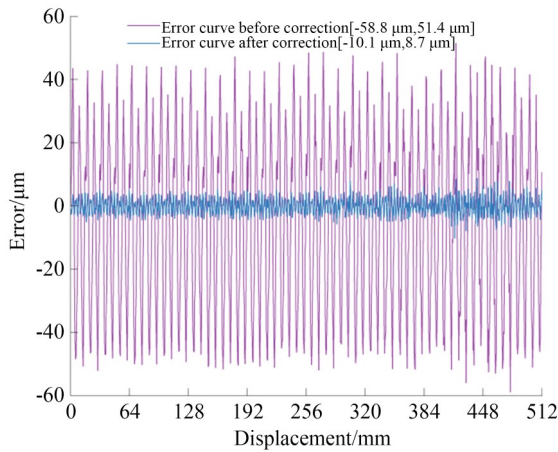


图 18 传感器整量程测量误差曲线

Fig. 18 Measurement error curves within full range of sensor

等、传感器样机制造误差,导致正弦/余弦激励绕组或感应绕组并非严格空间正交,致使本应时间与空间两两正交的两路驻波信号产生畸变,在对极内产生 2 次和 4 次谐波误差,其次钢球尺寸误差可能引发的 2 次谐波误差,同样会导致测量结果中包含 2 次谐波误差。2 次和 4 次谐波误差经过 32 个对极叠加后,产生了 64 次和 128 次谐波误差。

采用谐波修正法对原始测量误差曲线进行修正,通过对原始测量误差进行傅里叶变换得到各谐波分量及谐波幅值,由上位机中的软件修正程序进行误差修正,如图 18 所示,原始测量误差不超过 $\pm 55.1 \mu\text{m}$,采用谐波修正法对原始误差

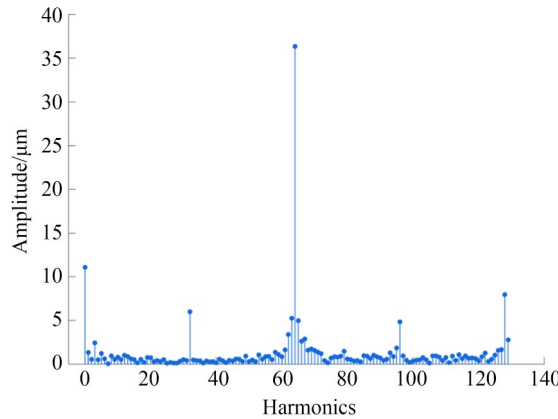


图 19 传感器整量程测量误差频谱

Fig. 19 Measurement error spectrum within full range of sensor

表 3 整量程测量误差的主要谐波分量

Tab. 3 Main harmonic components of measurement error within full range

谐波频次	幅值/ μm	谐波频次	幅值/ μm
64 次	36.33	65 次	4.98
直流分量	11.06	96 次	4.83
128 次	7.95	62 次	3.39
32 次	5.98	67 次	2.87
63 次	5.25	129 次	2.78

进行修正,修正后其大小 $\pm 9.4 \mu\text{m}$ 。

4.7 分辨力测试实验

传感器量程 $L=512 \text{ mm}$,对极数 $N=32$,通过公式(16)计算传感器分辨力可达 $0.1 \mu\text{m}$ 。通过直线电机控制系统控制电机同步带动动尺相对定尺运动,逐步施加 $0.1 \mu\text{m}$ 的移动位移,每步保持 5 s,并记录传感器输出的测量数据,结果如图 20 所示,分析实验数据可知,传感器输出的最小测量值为 $0.1 \mu\text{m}$,因此,传感器的测量分辨力为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

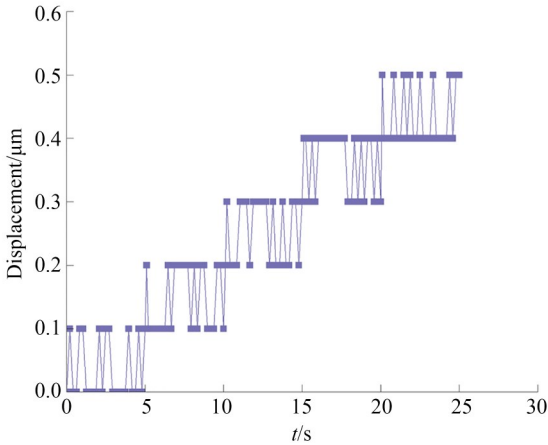


图 20 传感器分辨力测试数据图

Fig. 20 Resolution test results of sensor

该基于球阵列的磁阻式时栅位移传感器与同类型主流产品的技术参数对比如表 4 所示。本文基于球阵列的磁阻式时栅位移传感器与国外主流产品相比,毫米级的传感单元降低了对加工工艺要求,从而降低了传统位移传感器对高精度栅线刻划的依赖,无需借助细分技术提高测量分

表 4 主流传感器技术参数对比

Tab. 4 Comparison of performance parameters of mainstream sensors

传感器类型	测量范围	精度	分辨力	优势	劣势
Heidenhain LIDA400 系列	240~3 040 mm (需拼接)	$\pm 5\text{ }\mu\text{m}$	$0.2\text{ }\mu\text{m}$ (100倍细 分)	高精度、高分辨力	价格高、易受粉尘、 油影响,精度与分 辨力受精密切划制 造工艺的制约
Magnescale SL110	200~2 000 mm (需拼接)	$(50+10L/1\text{ }000)\text{ }\mu\text{m}$ L :测量范围(mm)	$10\text{ }\mu\text{m}$ (500倍细 分)	成本低,可在油污、粉尘等恶劣 环境中正常工作	精度和分辨力受 限,易受磁场影响
本文传感器	512 mm (量程可按需扩 展,无需拼接)	$\pm 9.4\text{ }\mu\text{m}$	$0.1\text{ }\mu\text{m}$ (无需细分)	易安装,防水,抗油污、粉尘等污 染的能力强,毫米级的传感单元 降低了对加工工艺要求,成本低	重量相对同类产品 略重

辨力,具有易安装、可用于强油污等恶劣环境下以及量程可按需扩展等优势。

5 结 论

针对高精度位移测量技术需求的日益提高,要求传感器在复杂恶劣环境下的能够实现大量程的同时兼备高精度。往往测量精度限制测量量程的扩大,又受限于加工设备和加工技术的发展。面对此技术瓶颈,提出了一种基于球阵列的磁阻式时栅位移测量新方法,通过球阵列精确控制磁场在空间的分布,利用空间正交的感应绕组实现对位移测量信号的拾取。在 512 mm 测量范围内,传感器原始测量误差不超过 $\pm 55.1\text{ }\mu\text{m}$,修正后的误差为 $\pm 9.4\text{ }\mu\text{m}$,分辨力为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$,传感器具有以下优势:

(1)研究结合尺杆可无限接长且密封的特点制作定尺,实现了大量程测量,适应恶劣环境需求,可靠性更高。通过控制绕组在尺杆上的结构分布控制磁场分布区域,利用尺杆内钢球对磁场进行精密约束。

(2)利用时间尺度提高空间尺度的测量精度和分辨力,建立感应电信号与位移测量、时间基准的映射关系,采用毫米级传感单元实现微米级测量精度,大大降低了传感器的制造难度。

(3)量程可按需扩展,无需借助细分技术实现高分辨力位移测量,可用于强油污等恶劣环境下位移测量。

本研究传感器样机中的绕组、基体及动尺外壳均采用组装式结构,结构不紧凑,下一步将采用精密绕线工艺或微纳加工技术优化线圈绕组结构,开展钢球尺寸及加工误差、安装误差对测量精度影响的研究,提高位移测量精度。

作者贡献声明:

- 陈自然:方案设计、测量方法的提出;
秦莉莉:论文撰写、数据整理和分析;
王伟:测量实验数据分析;
熊昕:论文构思、论文审核;
刘振越:测量实验的设计;
郑永海:测量实验的设计。

参考文献:

[1] ZHANG C, DONG Y S, HU P C, *et al.* Nonlinearity-suppressed micro-probe fiber optic interferometer for accurate long-range displacement measurements [J]. *Optics Communications*, 2024, 573: 131004.

[2] TAKUSHIMA S, KAWANO H, NAKAHARA H, *et al.* On-machine multi-directional laser displacement sensor using scanning exposure method for high-precision measurement of metal-works [J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 437-444.

[3] LI Z L, DAI Y F, GUAN C L, *et al.* An on-machine measurement technique with sub-micron accuracy on a low-precision grinding machine tool [J].

- Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 119: 520-530.
- [4] 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): 1869-1878.
- ZHOU L, WANG Z H, SUN D C, *et al.* Present situation and development of modern precision measurement technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1869-1878. (in Chinese)
- [5] SHORE P, CUNNINGHAM C, DEBRA D, *et al.* Precision engineering for astronomy and gravity science[J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(2): 694-716.
- [6] XU J, HUANG Q X, ZHAO Z H, *et al.* Non-contact optical probe with nanometer resolution and large measurement range based on the astigmatism method[J]. *Measurement*, 2023, 222: 113717.
- [7] MAGNESCALE SL110 [EB/OL]. [2024-12-12]. <https://www.magnescale.com/zh/products/sl110/>.
- [8] HEIDENHAIN. Exposed Linear Encoders [EB/OL]. [2024-12-12]. https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Exposed_Linear_Encoders_ID208960_en.pdf.
- [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): 2591-2611.
- LI X H, CUI C. Grating interferometric precision nanometric measurement technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2591-2611. (in Chinese)
- [10] 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, WU G H. Development of miniature optical encoder for precise displacement measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 9-19. (in Chinese)
- [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.
- GAO X, LI S H, MA Q L, *et al.* Development of grating-based precise displacement measurement technology [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741. (in Chinese)
- [12] ZHAO C H, WAN Q H, LU X R, *et al.* Moiré fringe signal subdivision system of a stained code disc of a grating displacement sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(9): 8614-8621.
- [13] 任雪玉, 黄焱, 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): 25-34.
- 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): 25-34. (in Chinese)
- [14] 廖晶晶, 祝连庆, 宋言明, 等. 基于双金属结构的光纤光栅温度不敏感滤波器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 322-329.
- LIAO J J, ZHU L Q, SONG Y M, *et al.* Fiber Bragg grating temperature insensitive filter based on bimetal structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 322-329. (in Chinese)
- [15] KIM M, MOON W, YOON E, *et al.* A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long-range [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 130: 135-141.
- [16] SPHEROSYN 2G and MICROSYN 2G Linear Encoders [EB/OL]. [2024-12-12]. <https://sensata.com/products/position-sensors-encoders/spherosyn-2g-and-microsyn-2g-linear>.
- [17] 陈自然, 张衍满, 何智颖, 等. 基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器及误差特性[J]. 光学精密工程, 2023, 31(19): 2836-2849.
- CHEN Z R, ZHANG H X, HE Z Y, *et al.* Magnetic field time-gate displacement sensor based on discrete winding and its error characteristics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(19): 2836-2849. (in Chinese)
- [18] 陈自然, 黎锡, 冯曦顿, 等. 基于差极结构的绝对式直线时栅位移传感器研究及测量误差特性分析[J]. 光学精密工程, 2022, 30(6): 667-677.
- CHEN Z R, LI X, FENG X J, *et al.* Research on absolute linear time-grating displacement sensor with one-pole-difference structure and analysis of measurement error characteristics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(6): 667-677. (in Chinese)
- [19] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 基于谐波修正法的高精度时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 31-33.
- PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, *et al.* High-precision time-grating displacement sensor based on harmonic wave correcting method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(1): 31-33. (in Chinese)

- [20] 杨继森,陈自然,张天恒,等. 时栅传感器直驱式误差自动标定与修正系统[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 968-975.
YANG J S, CHEN Z R, ZHANG T H, *et al.*

Automatic error calibration and correction system for time grating angular displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37 (5): 968-975. (in Chinese)

作者简介:



陈自然(1980—),男,湖北广水人,博士,研究员,博士生导师,2012年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事精密位移测量及智能仪器设计。
E-mail: czr@cqut.edu.cn

通讯作者:



熊 昕(1992—),男,重庆人,博士,助理研究员,硕士生导师,2020年于日本东北大学获得博士学位,主要从事精密仪器及机械、超精密光学测量等方面的研究。
E-mail: xinxiang@cqut.edu.cn