

多频磁场耦合的绝对式直线时栅位移传感器研究

杨继森^{1,2,3} 袁俊松^{1,3*} 修 府^{1,3} 刘嘉诚^{1,3} 张小龙^{1,3}

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.重庆理工大学汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室,重庆,400054

3.重庆理工大学时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室,重庆,400054

摘要:针对双列平面磁场式传感器两码道激励频率相同时磁场之间的相互串扰影响传感器测量精度并降低信噪比等问题,提出了一种多频磁场耦合的绝对式直线时栅位移传感器设计方案,在实现解算绝对位移的同时能够消除码道间磁场串扰的问题。传感器分为定尺和动尺,都采用双层交替结构,定尺使用两列增量式码道组合而成,分为精机和粗机,两列激励线圈的对极数为互质关系的两个整数,利用对极内位移差实现绝对位移测量。精机测量通道和粗机测量通道同时通入不同频率的激励电流信号,其中精机为1 MHz高频电流信号,高频激励电流信号可以有效增强感应信号,提高电气处理系统的信噪比。通过外差降频的方法来提高传感器分辨力,有效地解决了通过提高激励信号频率来提高信号信噪比与传感器解算高分辨力难以兼顾的问题。通过电磁仿真分析对传感器进行了理论验证和误差分析。最后搭建实验平台进行了样机实验,实验结果表明,采用多频磁场耦合的绝对式传感器结构有效消除了精机与粗机之间的磁场串扰,传感器信噪比得到提高,在140 mm的测量范围内测量误差小于 $\pm 17.34 \mu\text{m}$ 。

关键词:绝对位移测量;多频磁场耦合;信噪比;位移传感器

中图分类号: TH711

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Absolute Linear Time-grid Displacement Sensors with Multi-frequency Magnetic Field Coupling

YANG Jisen^{1,2,3} YUAN Junsong^{1,3*} XIU Fu^{1,3} LIU Jiacheng^{1,3} ZHANG Xiaolong^{1,3}

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

2.Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing, 400054

3.Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing, 400054

Abstract: Aiming at the problems of mutual crosstalk among magnetic fields affecting the measurement accuracy of the sensors and reducing the signal-to-noise ratio when the excitation frequency of two code channels of a dual-row planar magnetic field sensor was the same, a multi-frequency magnetic field coupled absolute linear time-grid displacement sensor design scheme was proposed, which achieved the solution to the problems of eliminating the crosstalk of the magnetic fields among the code channels while solving the absolute displacement. The sensor was divided into fixed scale and dynamic scale, both using double-layer alternating structure, fixed scale using two columns of incremental code channel combination, divided into fine and coarse machines, the pairs of poles of two rows of excitation coils were two integers of the reciprocal relation, the absolute displacement measurement was realized by using the pairs of poles within the displacement difference. Precision machine measurement channel and rough machine measurement channel were input different frequencies of the excitation current signals at the same time, the precision machine was input the 1 MHz high-frequency current signals, the high-frequency excitation current signals might effectively enhance the inductive signals, improve the signal-to-noise ratio of the electrical processing system. Through the method of outlier frequency reduction, the sensor resolution was improved, which effectively solved the problems that it was difficult to reconcile the signal-to-noise ratio enhancement of the signals by increasing

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(52175454);重庆市高等学校优秀人才支持计划;重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-MSX 0382);重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K202301106)

the frequency of the excitation signals and the high resolution of the sensors. Theoretical validation and error analysis of the sensors were carried out through electromagnetic simulation analysis. Finally, the experimental platform was built to carry out prototype experiments, and the experimental results show that the absolute sensor structure with multi-frequency magnetic field coupling effectively eliminates the magnetic field crosstalk between the fine and coarse machines, and the signal-to-noise ratio of the sensors is improved, with measurement errors are less than $\pm 17.34 \mu\text{m}$ in the measurement range of 140 mm.

Key words: absolute displacement measurement; multi-frequency magnetic field coupling; signal-to-noise ratio; displacement sensor

0 引言

随着现代社会科学技术的快速发展,精密直线位移测量传感器在工业生产、医疗器械和航空航天等多个领域有着至关重要的作用^[1-4]。相对于增量式传感器,绝对式传感器能够直接输出绝对位置信息,无需通过累积计算或其他参考数据,从而避免传感器产生累积误差,具有精度高、抗干扰能力强以及可靠性高等优点,在工业生产、科学研究等方面得到了广泛应用^[5-6]。目前市场上占比最大的是绝对式光栅传感器,如海德汉(HEIDENHAIN)公司开发出了高精度、高分辨率的绝对式直线光栅尺,在量程 4240 mm 内,测量精度达到 $\pm(3\sim 5)\mu\text{m}$ 。依赖于高精密切割加工技术,光栅传感器的制造成本较高,并且光栅传感器的相关专利绝大部分被外国公司所控制,对我国形成专利壁垒^[7-9]。

时栅是我国自主研发的位移传感器,以“时空转换原理”为基础,将空间的位移变化转化为时间变化来测量物体位置信息,避免了空间栅线刻划的制造难度^[10-12]。关于两码道绝对式时栅位移传感器,许多学者已展开了研究。刘小康等^[13]提出一种基于分时方法的高精度反射绝对式时栅传感器,以电场增量式时栅传感器为基础,采用差级结构方式实现绝对位置测量;邓志钊等^[14]提出一种基于分时复用方法的绝对式时栅位移传感器,分时间段分别给码道 I 和码道 II 提供激励,通过使用分时复用方式实现绝对位移测量,可简化传感器结构、降低传感器功耗;陈自然等^[15]提出一种基于平面磁场双列结构的绝对式时栅传感器,采用两列不同级距“几”字形结构定尺绕组,以差级结构方式实现绝对定位。

为减小精测部分和粗测部分两码道之间的串扰,绝对式时栅传感器采用分时复用结构方式在不同时间段施加激励于硬件上并通过开关实现切换,但需要先后等待精测部分和粗测部分数据稳定,解算绝对位移信息实时性较低。电场式时栅传感器受制于环境因素的影响,它的抗干扰能力不如磁场式时栅传感器。总结现有研究和存在问

题,本文提出一种基于多频磁耦合的绝对式直线时栅位移传感器,两列激励线圈同时通入不同频率的激励电流信号,经过电路处理系统将两列信号提取分离,以消除平面双列码道磁场之间的串扰,能够有效地实现实时绝对位移信息测量。两列激励线圈的对极数为互质关系的两个整数,可以提高传感器绝对位置解算的准确度,并提高精测对极数解算的精确度。该传感器采用一种双层激励线圈结构,感应线圈也采用上下交替结构方式,以增强磁场均匀性和感应信号强度、提高信噪比。

1 传感器结构及位移测量原理

1.1 传感器瞬态磁场数学模型

电磁感应现象源于电荷的运动,磁场之间的相互作用本质是运动电荷相互之间的运动,稳定的电流可以构建稳恒磁场。

在实际工程应用中,通常采用一定宽度的通电导线去构建交变磁场,而实际应用产生的磁场分布与理想情况下有所差异(不是绝对均匀的磁场),在此情况下需要通过理论分析来建立磁场分布情况的数学模型并进行误差溯源。假设一载流直导线的通电电流为 I ,如图 1 所示。

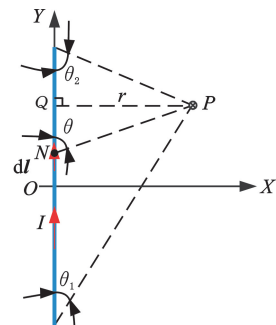


图 1 载流直导线在真空中产生的磁场

Fig.1 Magnetic field generated by a current-carrying straight wire in a vacuum

图 1 中,平面任意点 P 到载流直导线的垂直距离为 r ,与导线的垂直交点为点 Q ,根据毕奥-萨伐尔定律,电流微元 $I dl$ 在平面上任意点 P 产生的磁场强度为

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (1)$$

式中： μ_0 为真空磁导率，其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。

P 点到导线两端的角度分别为 θ_1 和 θ_2 ，载流直导线在点 P 产生的磁场强度 B 可表示为

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi |PQ|} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (2)$$

电流微元 $I d\mathbf{l}$ 和垂直距离矢量 \mathbf{r} 为矢量叉乘关系，根据直导线电流方向得到平面内点 P 的磁场方向为垂直于平面 PA_1B_1 。在三维空间中磁场分布的示意图见图 2。

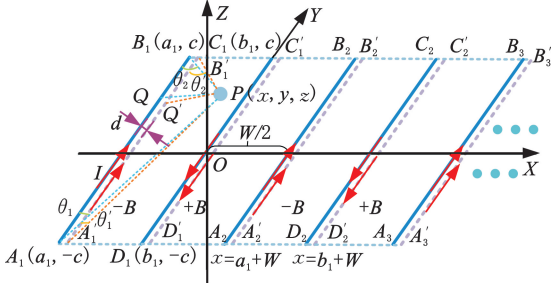


图 2 直导线激励磁场示意图

Fig.2 Schematic diagram of the excitation magnetic field of a straight wire

图 2 中， $(a_1, -c)$ 、 (a_1, c) 、 (b_1, c) 、 $(b_1, -c)$ 分别为点 A_1 、点 B_1 、点 C_1 、点 D_1 在 OXY 坐标系下的坐标，载流直导线 A_1B_1 和 $A_1'B_1'$ 通入电流 I ， $A_1'B_1'$ 在 A_1B_1 的 Z 轴正下方，垂直距离为 d ，点 P 与 A_1B_1 导线两端夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ，点 P 与 $A_1'B_1'$ 导线两端夹角分别为 θ_1' 和 θ_2' ，在三维空间中任意一点 $P(x, y, z)$ 磁场大小为

$$B_P = B_{A_1B_1} + B_{A_1'B_1'} \quad (3)$$

$$B_{A_1B_1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi |PQ|} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (4)$$

$$B_{A_1'B_1'} = \frac{\mu_0 I}{4\pi |PQ'|} (\cos \theta_1' + \cos \theta_2') \quad (5)$$

$$|PQ| = \sqrt{(x - a_1)^2 + z^2}$$

$$\cos \theta_1 = \frac{y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y + c)^2 + z^2}}$$

$$\cos \theta_2 = \frac{-y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y - c)^2 + z^2}}$$

$$|PQ'| = \sqrt{(x - a_1)^2 + (z + d)^2}$$

$$\cos \theta_1' = \frac{y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y + c)^2 + (z + d)^2}}$$

$$\cos \theta_2' = \frac{-y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y - c)^2 + (z + d)^2}}$$

由于感应线圈与激励线圈之间相互平行，激励磁场只需要点 P 在 Z 方向上的分量，且与上下层激励线圈的夹角分别为 γ 和 γ' ，则有

$$\left. \begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{a_1 - x}{\sqrt{(a_1 - x)^2 + z^2}} \\ \cos \gamma' &= \frac{a_1 - x}{\sqrt{(a_1 - x)^2 + (z + d)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

通过式(4)和式(5)可求得点 P 磁场强度在 Z 方向上的分量：

$$\left. \begin{aligned} B_{A_1B_1z} &= B_{A_1B_1} \cos \gamma = \\ &= \frac{\mu_0 I (a_1 - x)}{4\pi [(x - a_1)^2 + z^2]} \cdot \\ &= \left(\frac{y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y + c)^2 + z^2}} + \frac{-y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y - c)^2 + z^2}} \right) \\ B_{A_1'B_1'z} &= B_{A_1'B_1'} \cos \gamma' = \\ &= \frac{\mu_0 I (a_1 - x)}{4\pi [(x - a_1)^2 + (z + d)^2]} \cdot \\ &= \left(\frac{y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y + c)^2 + (z + d)^2}} + \frac{-y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y - c)^2 + (z + d)^2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则点 P 的磁场强度大小由各个导线产生的磁场叠加而成，在 Z 方向的磁场分量 $B_Z(x, y, z)$ 为

$$B_Z(x, y, z) = \sum_{i=1}^{m+1} B_{A_iB_i z} + \sum_{j=1}^m B_{C_jD_j z} + \sum_{i=1}^{m+1} B_{A_i'B_i' z} + \sum_{j=1}^m B_{C_j'D_j' z} \quad (8)$$

式中： m 为载流直导线数量。

在式(8)的基础上，使用数值仿真软件对载流直导线磁场进行仿真，仿真参数如表 1 所示，磁场分布如图 3 所示。

表 1 载流直导线仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of current-carrying straight wires

参数名称	数值
真空磁导率 $\mu_0 / (\text{N} \cdot \text{A}^{-2})$	$4\pi \times 10^{-7}$
电流 I / A	0.1
节距 W / mm	4
节距数 / 个	4

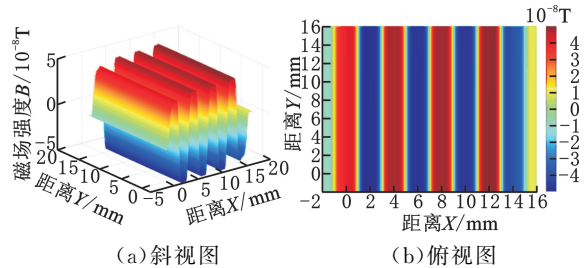


图 3 载流直导线磁场分布

Fig.3 Magnetic field distribution of current-carrying straight wires

由图 3 可以看出，使用双层激励线圈结构时，两导线中间磁场分布均匀性较好，则可以根据此磁场特性设计传感器的结构。

1.2 单列式传感器结构设计

磁场式时栅传感器使用载流直导线在空间中构建均匀变化的交变磁场，磁场的均匀性和强度

大小与传感器结构相关。本研究中设计了一种一上一下双层交替绕线的激励线圈结构,如图 4 所示。

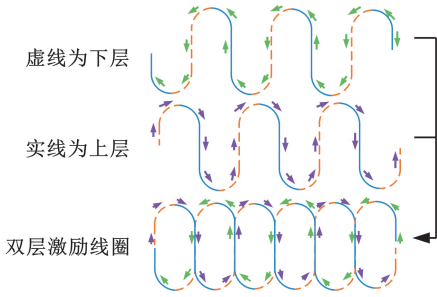


图 4 单组激励线圈示意图

Fig.4 Schematic diagram of a single excitation coil

由图 4 可以看出,除去激励线圈两端,中间导线实现了双层布线,单个结构的示意图见图 5。

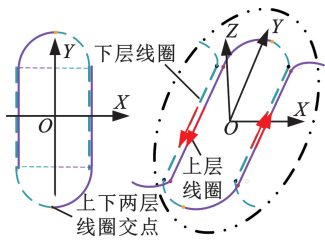
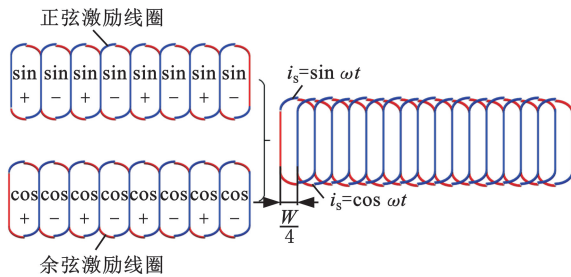


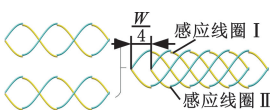
图 5 局部示意图

Fig.5 Schematic diagram of a local area

根据单组激励线圈结构,激励线圈一个节距为 W ,可以使用两组激励线圈在水平方向上错开 $W/4$ 以构成空间上正交,分别通入正弦激励电流 $i_s = \sin \omega t$ 、余弦激励电流 $i_c = \cos \omega t$,并在时间上达到正交,感应线圈将两个驻波合成为行波。感应线圈与激励线圈同理,使用正弦绕组方式,采用一上一下交替结构,在相同层级结构上,两组感应线圈错开 $W/4$,采用两组感应线圈提高感应信号强度,如图 6 所示。



(a) 激励嵌套结构



(b) 感应嵌套结构

图 6 传感器嵌套结构

Fig.6 Sensor nested structures

感应线圈的总感应电动势由感应线圈 I 和感应线圈 II 串联叠加而成,其表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} e_{\text{I}} &= k \sin(\omega t - \frac{2\pi x}{W}) + \Delta e \\ e_{\text{II}} &= k \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{W}) + \Delta e \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\omega = 2\pi f$$

式中: e_{I} 、 e_{II} 分别为感应线圈 I 和感应线圈 II 的感应电动势; k 为正弦感应系数; x 为感应线圈相对于激励线圈的位移; f 为激励电流频率; Δe 为共模干扰。

在实际工程应用中,由于内外部干扰信号相同,两组感应线圈会存在较小的共模干扰 Δe ,需要将两组感应线圈产生得到的感应电动势串联相减,以此来消除共模干扰 Δe ,传感器感应信号 U_e 可表示为

$$U_e = k \sin(\omega t - \frac{2\pi x}{W}) + \Delta e - k \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{W}) - \Delta e = \sqrt{2} k \sin(\omega t - \frac{2\pi x}{W} - \frac{\pi}{4}) \quad (10)$$

由此可知,两组感应线圈的感应信号 U_e 强度是单组感应线圈信号强度的 $\sqrt{2}$ 倍,提高了传感器信噪比。

1.3 双列绝对式位移测量

绝对式位移传感器能够直接测量并输出待测物体的绝对位置信息。相对于增量式传感器,绝对式测量能够消除增量式测量在测量过程中的累积误差,同时能够有效保持当前的绝对位移信息。本文使用互质对极结构组成双列码道绝对式时栅传感器,如图 7 所示。

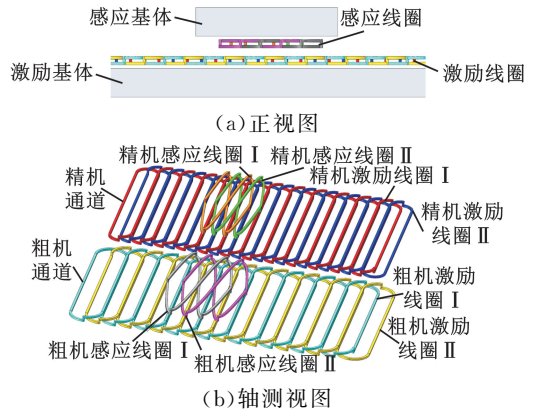


图 7 传感器结构视图

Fig.7 View picture of sensor structure

传感器互质结构包含两列测量通道,分为精机通道和粗机通道。设精机测量通道对极数为 N_1 ,测量的相位角为 φ_1 ,节距为 W_1 ,设粗机测量通道对极数为 N_2 ,测量的相位角为 φ_2 ,节距为 W_2 ,其中 N_1 和 N_2 数量满足互质关系,测量量程设为 l 。为方便理解后续绝对位移解算过程,设 $N_1 = 5, N_2 = 3$,其规律如图 8 所示。

由于精机通道和粗机通道的对极数相差 2 个对极,且为互质关系,若直接使用精机和粗机感应

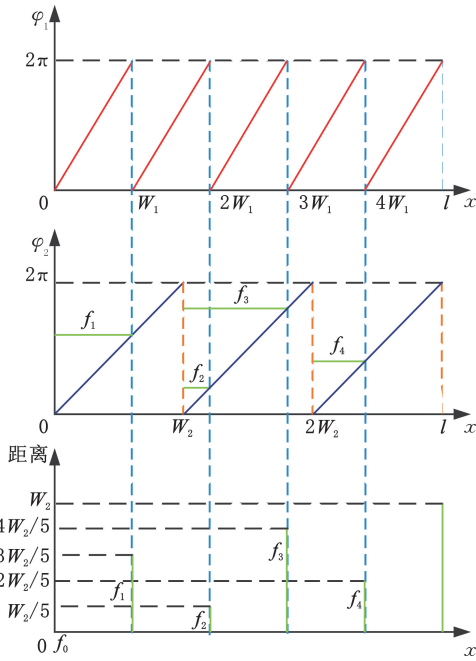


图 8 绝对位移求解

Fig.8 Absolute displacement solution

信号的相位差,则在整个测量周期上有两个周期变化,无法与精机的对极数 P_p 形成一一对应关系。计算精机对极内位移 x_1 和粗机对极内位移 x_2 ,通过将相位差解算为对极内的位移差 f_b ,可以与精机对极数 P_p 形成对应关系,如表 2 所示。位移差 f_b ($b=1,2,3,4$) 的表达式如下:

$$f_b = \begin{cases} x_2 - x_1 & x_2 - x_1 \geq 0 \\ x_2 - x_1 + W_2 & x_2 - x_1 < 0 \end{cases} \quad (11)$$

表 2 精机对极数对应关系

Tab.2 Correspondence between the number of stages of the precision machine pair

精机对极数 P_p	位移差 f_b	误差区间
4	$f_4 = 2W_2/5$	$f_4 \pm \Delta\epsilon$
3	$f_3 = 4W_2/5$	$f_3 \pm \Delta\epsilon$
2	$f_2 = W_2/5$	$f_2 \pm \Delta\epsilon$
1	$f_1 = 3W_2/5$	$f_1 \pm \Delta\epsilon$
0	$f_0 = 0$	$f_0 \pm \Delta\epsilon$

在实际应用中会存在测量误差,传感器将误差控制在精机对极数计算误差限 $\Delta\epsilon$ 范围内,则可以精确计算精机对极数, $\Delta\epsilon$ 的计算式为

$$\Delta\epsilon = \frac{W_1}{2N_2} = \frac{W_2}{2N_1} \quad (12)$$

由此,待测物体绝对位移 X 可以表示为

$$X = P_p W_1 + x_1 \quad (13)$$

1.4 多频磁场信号处理

绝对式位移传感器采用双列增量式码道结构,如精机和粗机测量通道同时通入相同激励电流频率 f ,感应线圈在位移测量过程中精机和粗机绕组产生的磁场之间会有一定的串扰,这对传感器后续提取相应测量通道位移信息带来一定困

难,从而影响传感器性能。一种解决办法是传感器绝对位移采用分时复用方式,传感器激励电流先通入粗机绕组,在感应线圈得到稳定的信号求解相位值后再断开粗机绕组激励电流,并将激励电流通入精机绕组,利用粗机和精机的测量数据求解得到传感器的精确位移值,且在后续位移测量过程中使用精机测量通道。然而持续使用精机增量式测量通道会形成一定的累积误差,且该测量方式无法实时解算出绝对位移信息。

精机绕组和粗机绕组通道分别使用不同频率激励电流信号,同时得到精机和粗机的位移值,利用绝对位移求解方法得到绝对位置,求解流程如图 9 所示。

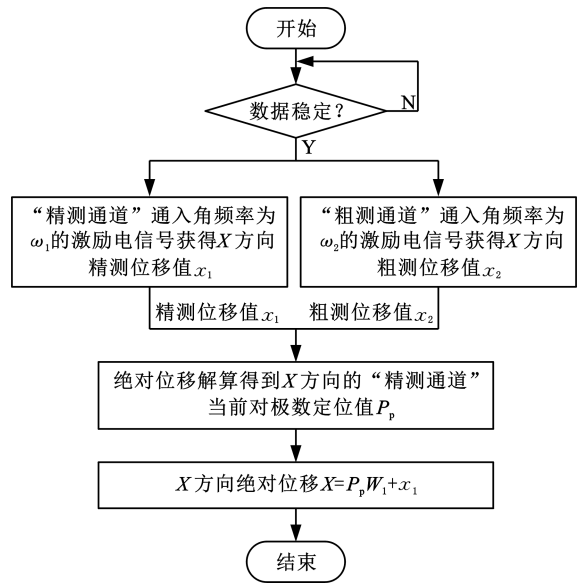


图 9 绝对位移求解流程

Fig.9 Absolute displacement solving process

采用多频磁场同时激励的方式来实现绝对位移测量,可以同时得到粗机和精机感应信号,实时解算绝对位移信息,避免分时复用方式累积误差,处理过程如图 10 所示。

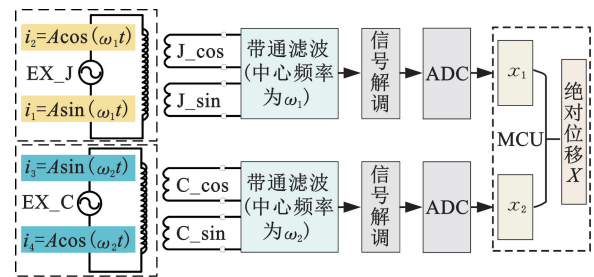


图 10 绝对位移信号处理

Fig.10 Absolute displacement signal processing

精机和粗机测量通道同时通入不同频率的激励电流信号,感应信号使用带通滤波器滤除相互之间的干扰,得到相对纯净的信号。精机需要得

到对极内精确位移值, 通入高频激励电流 i_1 和 i_2 , 对应角频率为 ω_1 , 粗机通入低频激励电流 i_3 和 i_4 , 对应角频率为 ω_2 , 关系式如下:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \sin \omega_1 t \\ i_2 &= \cos \omega_1 t \\ i_3 &= \sin \omega_2 t \\ i_4 &= \cos \omega_2 t \\ \omega_1 &> \omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

更高频率的激励电流能够提高传感器信噪比, 使用高频、高精度时间基准 F 对感应信号频率 f 进行插补计数, 其分辨力表示为 Wf/F 。更高的分辨力需要更高频率的时间基准信号或更低的传感器激励频率, 因前者受微处理器性能限制, 而后者较易实现。在不影响传感器结构和待测物体位置信息的情况下, 将高频信号降低为低频信号, 以解决高激励频率和高分辨力之间的矛盾, 这样依旧能够极大地提高传感器信噪比, 如图 11 所示。

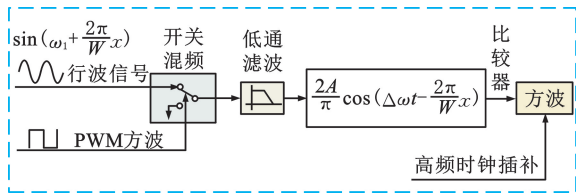


图 11 高频转低频示意图

Fig.11 Schematic diagram of high-frequency to low-frequency conversion

图 11 中行波信号与 PWM 控制信号有个固定的频率差值(即 $\Delta\omega$), 假设方波频率为 f_d , 对应角频率为 ω_d , 方波幅值为 $\pm A$, 则对方波傅里叶级数 $f(t)$ 表达式如下:

$$f(t) = \frac{4A}{\pi} (\sin \omega_d t + \frac{1}{3} \sin(3\omega_d t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_d t) + \dots) \quad (15)$$

$$\omega_d = \omega_1 + \Delta\omega$$

PWM 控制信号与行波信号通过模拟开关相乘, 方波的基频与行波信号相乘, 高次谐波经过低通滤波器滤除, 其表达式如下:

$$\begin{aligned} \sin(\omega_1 t + \frac{2\pi}{W}x) \frac{4A}{\pi} \sin((\omega_1 + \Delta\omega)t) &= \frac{2A}{\pi} \cos(\omega_1 t + \frac{2\pi}{W}x + \omega_1 t + \Delta\omega t) + \frac{2A}{\pi} \cos(\omega_1 t + \frac{2\pi}{W}x - \omega_1 t - \Delta\omega t) = \\ \frac{2A}{\pi} (\cos(2\omega_1 t + \Delta\omega t + \frac{2\pi}{W}x) + \cos(-\Delta\omega t + \frac{2\pi}{W}x)) \end{aligned} \quad (16)$$

经过低通滤波器处理后, 传感器位移信息被调制到低频信号 f_c 中, 其表达式如下:

$$f_c = \frac{2A}{\pi} \cos(\Delta\omega t - \frac{2\pi}{W}x) \quad (17)$$

通过调整基准信号频率 ω_d 来调整 $\Delta\omega$, 可以

实现将高频信号转化为低频信号, 不仅能有效解耦多频磁场中的位移信息, 还成功解决了传感器激励频率与分辨力之间相互制约的关系, 解决了以高频信号激励提高传感器信噪比的同时以降低分辨力为代价的问题。

2 传感器建模仿真与误差分析

2.1 传感器建模仿真

根据图 7 所示的传感器结构和原理, 使用电磁仿真软件 ANSYS Maxwell 构建电磁场仿真模型进行理论分析。传感器仿真模型中精机和粗机激励线圈的一个节距大小分别为 4.0 mm 和 5.7 mm, 激励线圈基体和感应线圈基体设置为不导电材料 Steel_1008, 激励线圈和感应线圈设置为 Copper, 激励电流幅值为 0.1 A, 精机测量通道激励电流信号频率为 1 MHz, 粗机测量通道激励电流信号频率为 100 kHz, 精机和粗机感应线圈运动方向设为向 X 轴正向同时移动, 精机和粗机根据不同激励信号频率的时长周期分别设置为 1.4 μ s 和 14 μ s, 精机和粗机的时间间隔分别设置为 0.02 μ s 和 0.2 μ s, 保证一个周期内有 70 个点, 使得感应曲线相对平滑, 具体参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数设置

Tab.3 Simulation parameter settings

参数	数值
激励电流幅值/A	0.1
精机激励电流频率/MHz	1
粗机激励电流频率/kHz	100
激励线圈匝数	1
感应线圈匝数	1
激励线宽/mm	0.2
感应线宽/mm	0.2
基体材料	(Steel_1008)
线圈材料	(Copper)
感应间隙	0.5
精机仿真距离/mm	4
精机运动步长/mm	0.2
精机仿真时长/ μ s	1.4
精机时间步长/ μ s	0.02
粗机仿真距离/mm	5.7
粗机运动步长/mm	0.3
粗机仿真时长/ μ s	14
粗机时间步长/ μ s	0.2

传感器通过电磁仿真得到的感应信号如图 12 所示, 其中每条正弦曲线——对应感应线圈的每个位置, 精机感应线圈 I 和 II 的输出信号大小为 95 mV, 将两者进行串联叠加, 可以看到信号增大到 135 mV, 在不影响位移解算和传感器尺寸大小的情况下, 两组感应线圈信号强度是单个感应线圈信号强度的 $\sqrt{2}$ 倍, 粗机与之同理。

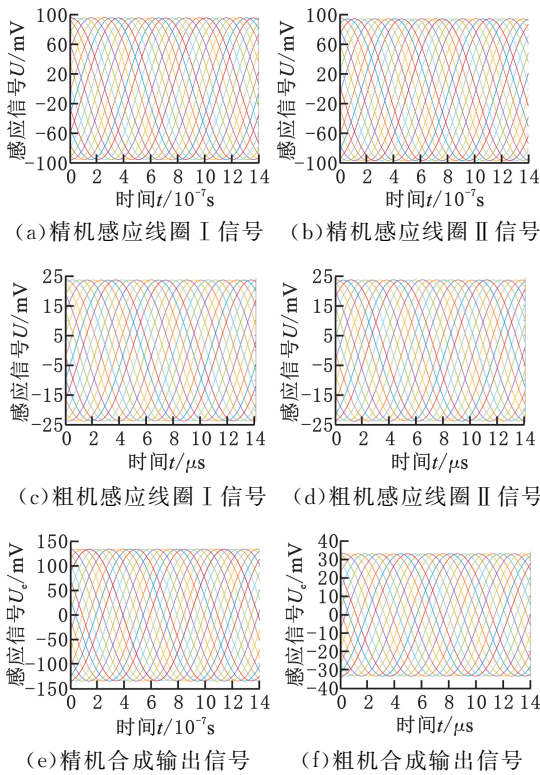


图 12 传感器仿真感应电动势

Fig.12 Sensor simulation of induced electromotive force

2.2 传感器误差分析

通过调整传感器激励线圈与感应线圈之间的间隙 δ , 发现传感器间隙为 0.5 mm 时, 误差峰峰值相对较小, 传感器性能较好。传感器仿真误差分析如图 13 所示, 因传感器采用双列码道互质对级数结构, 需要同时解算精机和粗机位移值, 故分别对精机位移和粗机位移进行误差分析。精机一个对级内位移误差峰峰值为 13.92 μm , 粗机一个对级内位移误差峰峰值为 18.78 μm , 对位移误差曲线进行快速傅里叶变换, 误差频次主要集中在 2 次, 4 次误差频次对应的误差相对很小, 表明此传感器结构产生的不同周期磁场一致性较好。

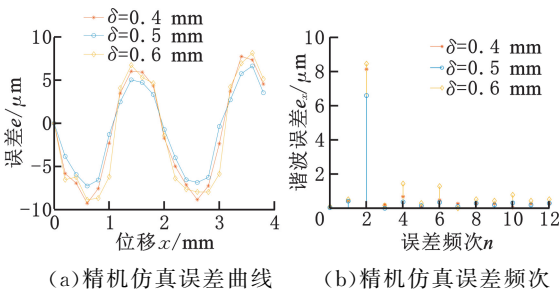


图 13 传感器仿真误差分析

Fig.13 Sensor simulation error analysis

3 实验验证

3.1 实验方案设计

根据传感器仿真模型采用成熟的印制电路板

(printed circuit board, PCB) 工艺制作传感器样机, 制作成本较低, 定尺结构尺寸(长 \times 宽)为 200 mm \times 46 mm, 动尺结构尺寸(长 \times 宽)为 60 mm \times 46 mm, 定尺和动尺样机厚度均为 1.6 mm, 如图 14 所示, 并搭建一维实验平台。

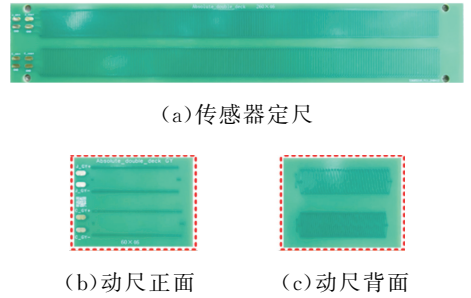


图 14 传感器 PCB 样机

Fig.14 Sensor PCB prototype

所搭建的实验平台如图 15 所示, 电源为硬件电路模块供电, 示波器检测动尺感应信号。传感器动尺安装在滚珠丝杠导轨上, 定尺固定在平台上, 伺服电机控制传感器动尺在 X 方向移动, 将感应线圈的感应信号通过信号处理电路解调后传入上位机进行统计数据。在实验平台上配备海德汉(HEIDENHAIN)高精度、高分辨率光栅传感器 LF481(光栅栅距为 4 μm , 经过 100 细分的细分盒输出, 每个信号脉冲当量为 0.04 μm), 并对传感器进行标定。通过实验平台实时采集传感器样机测量数据和光栅测量数据, 并计算得到测量误差。



图 15 一维实验平台

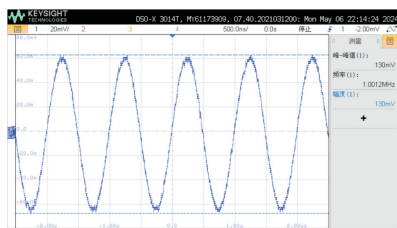
Fig.15 One-dimensional experimental platform

3.2 实验验证分析

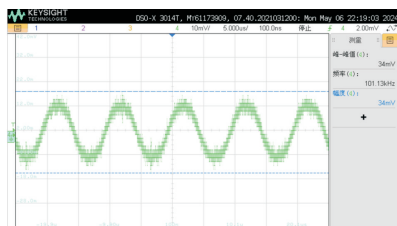
传感器原始信号强度如图 16 所示, 由此可看出感应信号受到外界环境干扰和精机与粗机之间的磁场相互串扰, 精机感应信号幅值为 130 mV, 粗机感应信号幅值为 34 mV, 传感器原始信号强度较高。传感器精机测量通道采用高频电流进行激励, 这对硬件电路性能提出了更高要求, 精机测量通道比粗机测量通道的感应信号强度高 3 倍。

对传感器进行稳定性测试, 如图 17 所示, 传感器动尺运动到一定位置后保持静止不动, 每间

隔 2 s 进行一次数据采集,总共采集 10 000 次,读取所有位移数据的波动性来判断稳定性。从图 17 中可知,位移波动幅值仅为 $1 \mu\text{m}$ 。



(a) 精机感应信号



(b) 粗机感应信号

图 16 原始信号强度

Fig.16 Original signal strength

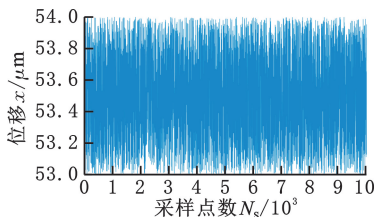


图 17 传感器稳定性测试

Fig.17 Sensor stability test

对传感器进行对极内误差分析,如图 18 所示,动尺在对极内水平移动 4 mm 和 5.7 mm,精机误差峰峰值为 $\pm 15.24 \mu\text{m}$,粗机误差峰峰值为 $\pm 18.22 \mu\text{m}$,然后对误差曲线进行快速傅里叶变换,误差频次主要集中在 2 次误差,这是由传感器安装误差以及正余弦激励电流幅值不相等、相位不正交引起的。

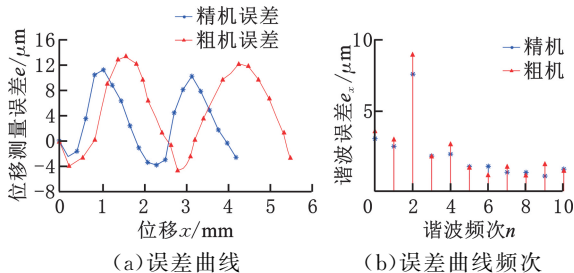


图 18 传感器对极内误差

Fig.18 Sensor intra-polar error

传感器样机量程为 140 mm,使传感器动尺水平移动 140 mm,步距设置为 0.5 mm,总共采集 280 个位移数据,分析大量程误差,如图 19 所示。根据测试结果,误差峰峰值为 $\pm 17.34 \mu\text{m}$,绝对式传感器可消除增量式结构的累积误差,保证

传感器在整个量程内的精度稳定。传感器的解算位移值与标准位移值满足良好的线性关系,由此看出该传感器测量能够达到预期的效果。

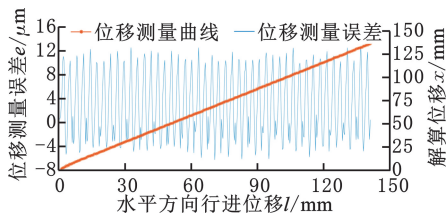


图 19 传感器位移测量曲线和误差

Fig.19 Sensor displacement measurement curves and error

4 结论

为进一步增强激励线圈的磁场强度和在三维空间中磁场均匀性,将传感器信噪比提高,且避免双列磁场式时栅传感器两码道之间的串扰,提高绝对式直线时栅位移传感器测量实时性,研制了一种基于多频磁场绝对式直线时栅位移传感器。本文首先对磁场构造进行理论分析,进而建立数学模型,根据毕奥-萨伐尔定律得到空间磁场的耦合特性;其次分析增量式传感器结构特性,将四相激励方式优化为两相激励,简化了激励线圈的绕线方式,同时采用一上一下交替布线方式,使激励线圈从一层变两层,两组线圈刚好可以错开 $W/4$ (W 为节距),相比四相激励方式,提高了磁场的强度和均匀性,磁场变得密集;然后将两列增量式码道组合成互质对极结构绝对式传感器,采用多频磁场同时激励方式,使用降频方式降低高频激励的感应信号频率,解决高频带来的分辨力问题;最后,制作印制电路板(PCB)搭建实验平台,并进行实验验证。实验结果表明,精机原始感应信号强度为 130 mV,粗机感应信号强度为 34 mV,在对极内精确测量位移值,误差峰峰值为 $\pm 15.24 \mu\text{m}$,进行 140 mm 量程误差测试,误差峰峰值为 $\pm 17.34 \mu\text{m}$;对传感器进行稳定性测试,位移波动幅值为 $1 \mu\text{m}$ 。

在以后研究中,为进一步提高绝对式传感器精度,将探索传感器线宽等影响,为后续研究绝对式传感器提供一定的参考。

参考文献:

- [1] ZHAO J Q, HE W, MENG F Y, et al. Wide-range Displacement Sensor Based on Variable Line-spacing Grating and Y-type Twin-core Fibre[J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(21):1555-1556.
- [2] 倪玉吉,王明娣,陈添禹,等.磁阻式电磁蓄能无针注射系统的设计与实验研究[J].中国机械工程,

- 2021, 32(2):227-234.
- NI Yuji, WANG Mingdi, CHEN Tianyu, et al. Design and Experimental Study of Magneto-resistive Electro-magnetic Energy Storage Needle-free Injection System [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(2):227-234.
- [3] PEYMAN S, SAIFOLLAH R, MOHAMMAD A K. Ultrahigh-dynamic-range Wavefront Sensor Based on Absolute Double-slit Interferometry [J]. Optics letters, 2022, 47(17):4516-4519.
- [4] 陈启迪, 胡小龙, 吝敏, 等. 超精密加工误差补偿技术研究综述[J]. 中国机械工程, 2023, 34(3):253-268.
- CHEN Qidi, HU Xiaolong, MIN Min, et al. A Review of Research on Error Compensation Technology for Ultra-precision Machining [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(3):253-268.
- [5] SHI Y, ZHOU Q, LI X, et al. Design and Testing of a Linear Encoder Capable of Measuring Absolute Distance [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 308:111935.
- [6] 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):1-7.
- [7] 高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. 中国光学, 2019, 12(4):741-742.
- GAO Xu, LI Shuhang, MA Qinglin, et al. A Review of the Development of Grating Precision Displacement Measurement Technology [J]. China Optics, 2019, 12(4):741-742.
- [8] LIU X F, XIE H, MENG H T, et al. Cylindrical Bidirectional Strain Sensors Based on Fiber Bragg Grating [J]. Materials, 2022, 15(15):5399-5399.
- [9] 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 Zhengjie, ZHANG Di, WU Guanhao. Development of Miniature Optical Grating Sensors for Precision Displacement Measurement [J]. Journal of Photonics, 2021, 50(9):9-11.
- [10] 杨继森, 周润, 张天恒, 等. 结构参数约束下的磁场补偿式双层时栅角位移传感器研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(19):2296-2303.
- YANG Jisen, ZHOU Run, ZHANG Tianheng, et al. Research on Magnetic Field Compensated Double-layer Time-grid Angular Displacement Sensor under Structural Parameter Constraints [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(19):2296-2303.
- [11] 杨继森, 付航, 秦梓洋, 等. 互补式双层时栅角位移传感器研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(4):431-439.
- YANG Jisen, FU Hang, QIN Ziyang, et al. Research on Complementary Double-layer Time-grid Angular Displacement Sensor [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(4):431-439.
- [12] 杨洪涛, 章刘沙, 费业泰, 等. 寄生式时栅传感器测量不确定度的分析与评定[J]. 中国机械工程, 2016, 27(18):2487-2493.
- YANG Hongtao, ZHANG Liuzha, FEI Yetai, et al. Analysis and Evaluation of Measurement Uncertainty of Parasitic Time-grid Sensor [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(18):2487-2493.
- [13] 刘小康, 梅现富, 蒲红吉, 等. 基于分时方法的高精度反射绝对式纳米时栅位移传感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9):97-105.
- LIU Xiaokang, MEI Xianfu, PU Hongji, et al. Design of High-precision Reflective Absolute Nano Time-grid Displacement Sensor Based on Time-sharing Method [J]. Journal of Instrumentation, 2021, 42(9):97-105.
- [14] 邓志钊, 蒲红吉, 于治成, 等. 一种分时复用的绝对式纳米时栅位移传感器设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(12):122-129.
- DENG Zizhao, PU Hongji, YU Zhicheng, et al. Design of an Absolute Nanometer Time-grid Displacement Sensor with Time Division Multiplexing [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(12):122-129.
- [15] 陈自然, 卜敬, 赵有祥, 等. 基于平面磁场的双列结构绝对式时栅传感器研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(4):463-469.
- CHEN Zhenran, BU Jing, ZHAO Youxiang, et al. Study on Absolute Time-grid Sensor with Double-row Structure Based on Planar Magnetic Field [J]. Journal of Sensing Technology, 2021, 34(4):463-469.

(编辑 胡佳慧)

作者简介: 杨继森, 男, 1977年生, 教授。研究方向精密测量与智能传感器。E-mail: yangjs@cqut.edu.cn。袁俊松* (通信作者), 男, 1997年生, 硕士研究生。研究方向为智能仪器与传感器。E-mail: 1437881679@qq.com。

本文引用格式:

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 Jisen, YUAN Junsong, XIU Fu, et al. Study on Absolute Linear Time-grid Displacement Sensors with Multi-frequency Magnetic Field Coupling [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):889-897.