第 44 卷　第 6 期
2023 年 6 月

仪　器　仪　表　学　报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 44 No. 6
Jun. 2023

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311422

基于气隙磁场分层耦合的直线时栅位移传感器研究*

杨继森,熊　浩,文　杰,庹万章
(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:针对前期研制的电磁式直线时栅位移传感器高信噪比和高时间插补分辨力难以兼顾的问题,设计了一种提高传感器信噪比的新传感器结构,另外提出了一种高信噪比、高时间插补分辨力的测量新方法,并研制了基于气隙磁场分层耦合的直线时栅位移传感器。建立传感器气隙磁场数学模型,分析气隙磁场空间分布特性,研究平面线圈气隙磁场分层耦合的原理;根据气隙磁场分层耦合原理,建立传感器气隙磁场分层耦合位移测量模型;对传感器测量模型进行电磁场仿真和误差分析;最后,搭建实验平台进行对传感器的性能进行测试。实验结果表明,采用气隙磁场分层耦合的结构提高了传感器的信噪比,传感器的测量精度在原有的基础上提高了 31.4%;采用的高信噪比和高时间插补分辨力测量方法,传感器的测量精度在原有的基础上提高了 37.3%。

关键词: 直线时栅位移传感器;气隙磁场;信噪比;指数形线圈
中图分类号: TH712　　**文献标识码**: A　　**国家标准学科分类代码**: 460.4030

Research on linear time-grating displacement sensor based on stratified coupling of air gap magnetic field

Yang Jisen, Xiong Hao, Wen Jie, Tuo Wanzhang
(*Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China*)

Abstract: It is difficult to balance the high signal-to-noise ratio and high time interpolation resolution of the electromagnetic linear time gate displacement sensor developed in the early stage. To address this issue, a new sensor structure for improving the signal to noise ratio of the sensor is designed, and a new measurement method with high signal-to-noise ratio and high time interpolation resolution is proposed. A linear time gate displacement sensor based on stratified coupling of air gap magnetic field is developed. The mathematical model of the sensor air gap magnetic field is formulated, the spatial distribution characteristics of the air gap magnetic field are analyzed, and the principle of hierarchical coupling of the air gap magnetic field of the plane coil is studied. According to the principle of stratified coupling of air gap magnetic field, a stratified coupling displacement measurement model of the sensor air gap magnetic field is established. Electromagnetic field is simulated and error of sensor measurement model is analyzed. Finally, an experimental platform is built to test the performance of the sensor. The experimental results show that the structure of layered coupling of air gap magnetic field improves the signal-to-noise ratio of the sensor, and the measurement accuracy of the sensor is improved by 31.4% on the original basis. The high signal-to-noise ratio and high time interpolation resolution measurement method are adopted. The measurement accuracy of the sensor is improved by 37.3% on the original basis.

Keywords: linear time-grating displacement sensor; air-gap magnetic field; signal-to-noise ratio; exponential shaped coil

0　引　　言

随着科学技术的快速发展,精密直线位移测量在精密机床、航空航天、医疗等领域中应用更加广泛,这些场合对直线位移传感器的信噪比、分辨力、抗干扰等性能也提出了更高的要求[1-4]。现有的许多位移传感器对环境要求较高、价格昂贵,而电磁式时栅位移传感器不同于其

收稿日期:2023-05-12　　Received Date: 2023-05-12
*基金项目:国家自然科学基金(51205434,52175454)、重庆市高等学校优秀人才支持计划项目、重庆理工大学研究生教育高质量发展行动计划(gzlcx20222044)项目资助

他类别的传感器,其采用“时间量”测量“空间量”的原理,具有低制造成本、抗干扰能力强的特点[5-9]。目前,许多学者对电磁式位移传感器做了深入研究,Rahal 等[10]研究了一种用于高频电感非接触式位置传感器的信号调节器,其接收印制线路板(printed circuit board, PCB)线圈采用正弦形绕线。Djuric[11]研究了一种带有感应螺旋线圈的平面位移传感器,采用螺旋线绕线的方式,其工作频率为 1 MHz。Aschenbrenner 等[12]研究了一种平面高频无接触式绝对感应位置传感器,将谐振电路应用于传感器耦合信号传输。

时栅位移传感器作为国内自主研发的位移传感器,近年来在高端制造、精密仪器等领域正得到越来越广泛的应用。针对电磁式时栅位移传感器高信噪比和高时间分辨力难以兼顾的问题,许多学者对此开展了研究。鲁进等[13]研究了变耦型时栅位移传感器,其激励线圈和感应线圈采用多匝绕线来提高信号强度,工作频率为 40 kHz。Wang 等[14]研究了一种使用简单齿轮的角度位移传感器,其使用高频时间脉冲作为标准来实现相位检测。杨继森等[15]研究了可抑制端部效应的平面磁场式直线时栅位移传感器,采用高频时钟插补鉴相的方式,其激励电流频率为 10 kHz。武亮等[16]研究了平面线圈线阵的直线时栅位移传感器,该学者研究了多匝磁场拾取线圈模拟磁通量的谐波误差,其激励电流频率为 40 kHz。

总的来讲,电磁式时栅位移传感器通常采用增加绕线匝数、提高激励信号频率等方式来提高传感器的信噪比。直接增加平面线圈的绕线匝数来提高传感器输出信号强度,受制于平面线圈加工工艺;传统平面线圈分层耦合绕线会改变传感器激励线圈和感应线圈的耦合气隙,势必会带来传感器空间气隙磁场谐波误差。因此,研究时栅位移传感器气隙磁场耦合理论来优化传感器结构,对提高传感器的信噪比,减小空间气隙磁场谐波误差,提高传感器的测量精度尤为必要。

前期研究的时栅位移传感器采用高频时钟插补鉴相的方式,将传感器输出行波信号的相位差转换为时间差进行高精度位移测量,高频时钟插补频率直接决定了测量感应信号时间差的分辨力。因此,先前的研究通常采用低频励磁的方式,传感器的耦合信号为低频感应信号。当使用高频激励信号,最明显的优势为直接提高了传感器的信噪比,但传感器的耦合信号会变为高频感应信号,会降低高频时钟插补时间差的分辨力。

针对以上问题,本文研究了气隙磁场分层耦合原理,提出了传感器气隙磁场分层耦合测量模型,该模型能够提高传感器感应信号强度。另外,本文提出了一种采用高频信号驱动,将感应线圈耦合到的高频感应信号调制成低频感应信号输出,在提高传感器的信噪比的同时,实现高时间分辨力,提高传感器的测量精度。

1　气隙磁场分层耦合原理

1.1　传感器气隙磁场数学模型

电磁式直线时栅位移传感器利用电磁感应原理测量位移,传感器动尺感应单元能够拾取激励单元产生的交变磁场。基于气隙磁场分层耦合的感应单元包括三层平面线圈,在空间上从下到上分别为指数形、正弦形和矩形线圈,传感器电磁耦合示意图如图 1 所示。

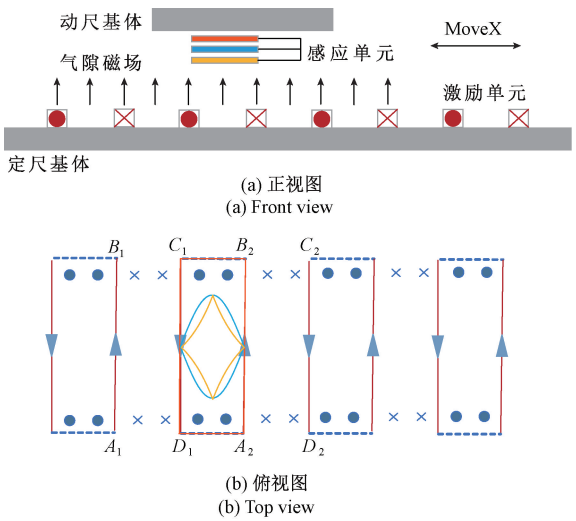


图 1　传感器电磁耦合示意图

Fig. 1　Schematic of electromagnetic coupling of the sensor

传感器采用通电导线绕线来构造其所需要的激励磁场,传感器气隙磁场数学模型如图 2 所示。

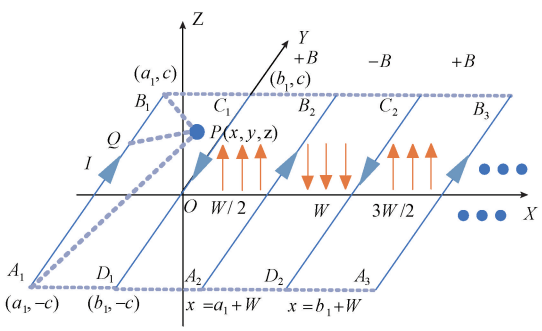


图 2　传感器气隙磁场数学模型

Fig. 2　Mathematical model of the sensor′s air gap magnetic field

给载流导线 A_iB_i,C_jD_j 分别通入电流 I,其中通电直导线 A_1B_1 中心线单独作用于空间任意点 $P(x,y,z)$ 在 Z 方向上的磁场分量 $B_{A_1B_1Z}$ 可以表示为:

$$B_{A_1B_1Z}=B_{A_1B_1}\cos\gamma=\frac{\mu_0 I(a_1-x)}{4\pi((x-a_1)^2+z^2)}\left(\frac{(y+c)}{\sqrt{(x-a_1)^2+(y+c)^2+z^2}}+\frac{(-y+c)}{\sqrt{(x-a_1)^2+(y-c)^2+z^2}}\right)\tag{1}$$

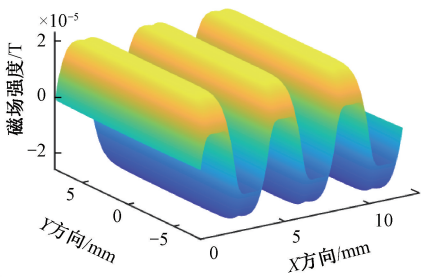
同理,通电直导线 C_1D_1 中心线单独作用于空间任意点 $P(x,y,z)$ 在 Z 方向上的磁场分量 $B_{C_1D_1Z}$ 可以表示为:

$$B_{C_1D_1Z}=B_{C_1D_1}\cos\gamma=\frac{\mu_0 I(x-b_1)}{4\pi((x-b_1)^2+z^2)}\left(\frac{(-y+c)}{\sqrt{(x-b_1)^2+(y-c)^2+z^2}}+\frac{(y+c)}{\sqrt{(x-b_1)^2+(y+c)^2+z^2}}\right) \tag{2}$$

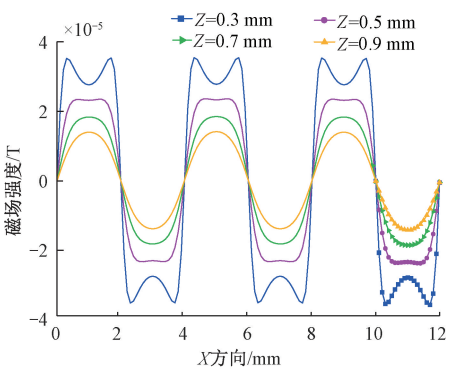
那么,在三维空间任意点 $P(x,y,z)$ 在 Z 方向上的磁场分量 $B_Z(x,y,z)$ 可以表示为:

$$B_Z(x,y,z)=\sum_{i=1}^{m+1}B_{A_iB_iZ}+\sum_{j=1}^{m}B_{C_jD_jZ} \tag{3}$$

真空磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ N/A^2,让电流 $I=0.1$ A,传感器节距 $W=4$ mm,$c=8$ mm,传感器激励线圈气隙磁场数值仿真结果如图 3 所示。图 3(a)为传感器激励单元在三维空间 $z=0.5$ mm 高度的气隙磁场三维视图,图 3(b)为传感器激励单元产生的气隙磁场在 ZOX 平面不同高度沿着 X 方向的磁场分布。



(a) 气隙磁场三维视图
(a) 3D view of the air gap magnetic field



(b) 不同耦合气隙的气隙磁场
(b) Air-gap magnetic fields with different coupled air gaps

图 3 传感器激励线圈气隙磁场数值仿真

Fig. 3 Numerical simulation of the air gap magnetic field of the sensor excitation coil

从图 3(b)中可以看出传感器激励单元产生的气隙磁场在 Z 方向上的磁场强度大小 $B_Z(x,y,z)$ 随着高度 z 的增加不断衰减,并且在不同高度呈现出不同类型的磁场,气隙磁场空间分布特性如图 4 所示。

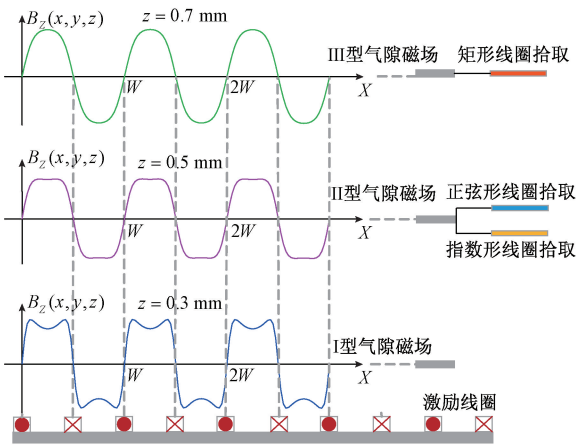


图 4 气隙磁场空间分布特性

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of air gap magnetic field

从图 4 中可以看出,激励线圈在励磁区域附近的气隙磁场分为 3 种类型,其中 Ⅰ 型气隙磁场在周期内抖动较为明显,其中包含丰富的谐波成分;Ⅱ 型气隙磁场近似分布均匀;Ⅲ 型气隙磁场为成分相对单一的基波磁场。

1.2 传感器耦合信号的正弦性与幅值

根据法拉第电磁感应定律,给激励线圈通入电流 I,感应线圈拾取到的感应电动势 e 可以表示为:

$$e=-N_2\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-N_2\frac{\mathrm{d}(N_1I\Lambda(x))}{\mathrm{d}t}=-N_1N_2\Lambda(x)\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

其中,N_1 为激励线圈匝数,N_2 为感应线圈匝数,$\Lambda(x)$ 为气隙磁导。从式(4)中可以看出,气隙磁导的正弦性会影响传感器感应信号的正弦性,而感应线圈的形状和气隙磁场的匹配性会影响传感器耦合信号的正弦性。感应线圈匝数 N_2 会影响感应信号幅值,另外联立式(1)~(3)可以看出,耦合间距 z 会改变气隙磁场强度大小,同样会影响传感器耦合信号的幅值。

当气隙磁场理想绝对均匀时,使用正弦形状的感应线圈,传感器耦合信号的正弦性最佳,但在工程应用中通常使用的为 Ⅱ 型近似均匀的气隙磁场。直接在不同层增加正弦线圈匝数,可能会耦合到 Ⅰ 型气隙磁场或者 Ⅲ 型气隙磁场,引入气隙磁场谐波误差,影响传感器耦合信号的正弦性。

当气隙磁场为理想基波时,使用矩形感应线圈,传感器的耦合信号的正弦性最佳,但在工程应用中使用的通常为 Ⅲ 型近似基波的气隙磁场。当耦合气隙较小时,直接在不同层增加矩形线圈匝数,可能耦合到 Ⅱ 型气隙磁场,影响传感器耦合信号的正弦性;当耦合气隙较大时,

直接在不同层增加矩形线圈匝数,可能会因耦合间隙过大使得传感器耦合信号幅值衰减。

针对以上问题,本文采用平面线圈气隙磁场分层耦合的方法来平衡感应信号的正弦性和感应信号幅值之间的矛盾。根据气隙磁场在空间的分布特点,利用不同形状的平面线圈在不同高度分层耦合,尽可能地提高传感器耦合信号的正弦性和信噪比。

1.3　平面线圈气隙磁场分层耦合原理

对于Ⅱ型气隙磁场其分布较为均匀可以利用指数形线圈和正弦形线圈来耦合;对于Ⅲ型气隙磁场则可以采用矩形线圈来耦合。给激励线圈通入 $I\sin(\omega t)$ 的交变电流,当指数形平面线圈相对于气隙磁场运动 λ 时,指数形平面线圈在气隙磁场中的耦合模型如图 5 所示。其中 X 为传感器耦合线圈运动方向(测量方向),Y 为耦合线圈高度方向,$f(x)$ 表示指数形平面线圈基本形状曲线,$f_1(x)$、$f_2(x)$ 表示指数形平面线圈轮廓曲线,W 为传感器节距。

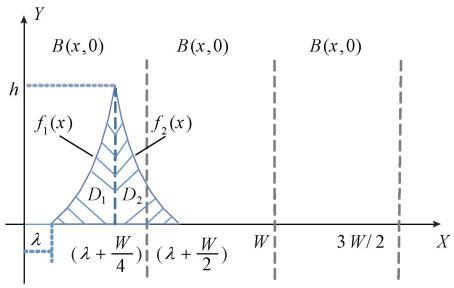


图 5　指数形平面线圈气隙磁场耦合模型

Fig. 5　Exponential planar coil air-gap magnetic field coupling model

$$\begin{cases} f(x)=\dfrac{h}{(e^{W/4}-1)}(e^{x}-1),x\in[0,W/4] \\ f_1(x)=f(x-\lambda)=\dfrac{h}{(e^{W/4}-1)}(e^{x-\lambda}-1), \\ x\in[\lambda,\lambda+W/4] \\ f_2(x)=f_1\left(2\left(\lambda+\dfrac{W}{4}\right)-x\right)= \\ \qquad \dfrac{h}{(e^{W/4}-1)}(e^{\lambda+\frac{W}{2}-x}-1), \\ x\in[\lambda+W/4,\lambda+W/2] \end{cases} \tag{5}$$

指数形状平面线圈所在的Ⅱ型气隙磁场在一个周期内的表达式简化后可以表示为:

$$B_{\exp}(x,0)=\begin{cases} k_{m1}\sin(\omega t) & x\in[0,W/2] \\ -k_{m1}\sin(\omega t) & x\in[W/2,W] \end{cases} \tag{6}$$

那么,指数形平面线圈拾取到的磁通可以表示为:

$$\phi(t,\lambda)=\iint_{D_1}B_{\exp}(x,0)\,dxdy+\iint_{D_2}B_{\exp}(x,0)\,dxdy=$$

$$\int_{\lambda}^{\lambda+\frac{W}{4}}B_{\exp}(x,0)f_1(x)\,dx+\int_{\lambda+\frac{W}{4}}^{\lambda+\frac{W}{2}}B_{\exp}(x,0)f_2(x)\,dx \tag{7}$$

通过积分运算,指数形状的平面线圈拾取到的磁通简化后可以表示为:

$$\phi_{\exp}(t,x)=k_{\phi\exp}\sin(\omega t)\cos\left(\frac{2\pi}{W}x\right)\quad x\in[0,W] \tag{8}$$

同理,正弦形状的平面线圈在 $[0,W/2]$ 的函数曲线可以表示为 $f(x)=h\sin\left(\frac{2\pi}{W}x\right)$,其在Ⅱ型气隙磁场 $B_{\sin}(x,0)$ 中拾取到的磁通简化后为:

$$B_{\sin}(x,0)=\begin{cases} k_{m2}\sin(\omega t), & x\in[0,W/2] \\ -k_{m2}\sin(\omega t), & x\in[W/2,W] \end{cases} \tag{9}$$

$$\phi_{\sin}(t,x)=k_{\phi\sin}\sin(\omega t)\cos\left(\frac{2\pi}{W}x\right),\ x\in[0,W] \tag{10}$$

在Ⅲ型气隙磁场耦合平面,矩形平面线圈在 $[0,W/2]$ 的函数曲线可以表示为 $f(x)=h$,其在Ⅲ型气隙磁场 $B_{\mathrm{rec}}(x,0)$ 中拾取到的磁通为:

$$B_{\mathrm{rec}}(x,0)=k_{m3}\sin(\omega t)\sin\left(\frac{2\pi}{W}x\right),x\in[0,W] \tag{11}$$

$$\phi_{\mathrm{rec}}(t,x)=k_{\phi\mathrm{rec}}\sin(\omega t)\cos\left(\frac{2\pi}{W}x\right),\ x\in[0,W] \tag{12}$$

对气隙磁场分层耦合数学模型进行数值仿真,为了便于积分运算,利式(13)对图 3(b)中的离散 $B_Z(x,y,z)$ 进行正弦曲线逼近拟合,取 $n=3$,近似代替 $B_{\exp}(x,0)$、$B_{\sin}(x,0)$ 和 $B_{rec}(x,0)$,利用式(7)进行数值积分,即可得到指数形平面线圈、正弦形平面线圈和矩形平面线圈拾取到的磁通。

$$B(x,0)=\sum_{i=1}^{n}a_i\sin(b_ix+c_i) \tag{13}$$

让激励单元的电流 $I=0.1$ A,指数形平面线圈的耦合气隙设置为 $z=0.4$ mm,正弦形平面线圈的耦合气隙设置为 $z=0.6$ mm,矩形平面线圈的耦合气隙设置为 $z=0.8$ mm,平面线圈气隙磁场耦合数值仿真如图 6 所示。

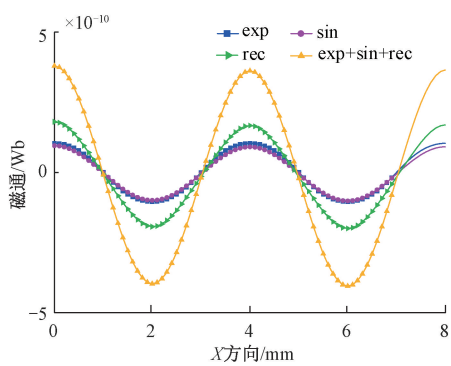


图 6　平面线圈气隙磁场耦合数值仿真

Fig. 6　Numerical simulation of air-gap magnetic field coupling of planar coils

从图 6 中可以看出，指数形平面线圈拾取到的磁通峰值为 1.04×10^{-10} Wb，正弦形平面线圈拾取到的磁通峰值为 0.91×10^{-10} Wb，矩形平面线圈拾取到的磁通峰值为 1.67×10^{-10} Wb，3 层平面线圈拾取到的磁通叠加后峰值为 $3,62\times10^{-10}$ Wb，与单层耦合方式相比磁通幅值提高了约 116.7%。感应线圈拾取的总磁通量为 $\phi_{all}(t,x)$，总的感应电信号输出可以表示为：

$$\phi_{all}(t,x)=\phi_{\exp}(t,x)+\phi_{\sin}(t,x)+\phi_{rec}(t,x) \tag{14}$$

$$e_{all}=-\frac{\mathrm{d}\phi_{all}(t,x)}{\mathrm{d}t}=k_{all}\omega\cos(\omega t)\cos\left(\frac{2\pi}{W}x\right) \tag{15}$$

其中，k_{all} 为指数形平面线圈、正弦形平面线圈和矩形平面线圈总的耦合比例系数，ω 为激励信号角频率，x 为平面线圈相对于气隙磁场运动的位移。将 $\omega=2\pi f$，代入式(15) 可以看出感应电信号的幅值正比于激励信号频率 f。因此，可以通过提高激励信号频率来提高传感器感应信号的幅值。

2 传感器气隙磁场分层耦合测量模型

2.1 传感器测量模型

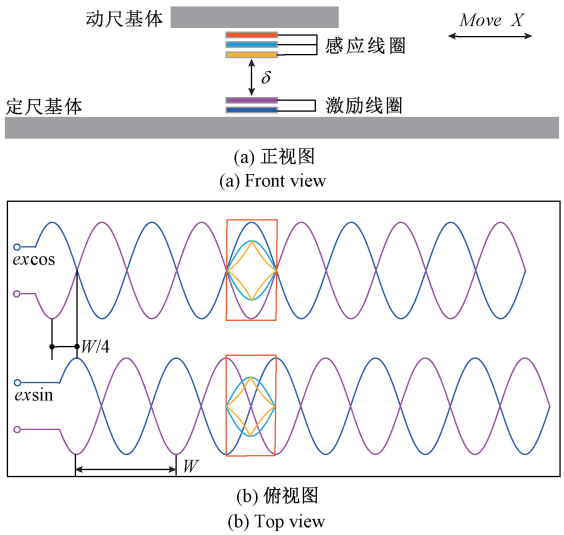
传感器的测量原理如图 7 所示。X 方向为传感器的测量方向，传感器的结构分为传感器定尺和传感器动尺两个部分，传感器定尺包括定尺基体和激励线圈；传感器动尺包括动尺基体和感应线圈。传感器的激励线圈包括 cos 激励线圈和 sin 激励线圈，两路激励线圈在 X 方向交错 $W/4$。传感器的感应线圈分为 3 层，从下到上依次为指数形状的感应线圈、正弦形状的感应线圈、矩形感应线圈，每一层的感应线圈在 X 方向上平齐。传感器的节距为 W，激励线圈与感应线圈的耦合气隙为 δ。给 cos 激励线圈通入电流 $i_c=-A\cos\omega t$，给 sin 激励线圈通入电流 $i_s=A\sin\omega t$，其中 $\omega=2\pi f$，f 为激励信号频率。

此时，两路指数形状的感应线圈拾取到的感应电压可以表示为：

$$\begin{cases}U_{c1}=k_1\sin(\omega t)\cos\left(\dfrac{2\pi}{W}x\right)\\ U_{s1}=k_1\cos(\omega t)\sin\left(\dfrac{2\pi}{W}x\right)\\ U_{O1}=U_{c1}+U_{s1}=k_1\sin\left(\omega t+\dfrac{2\pi}{W}x\right)\end{cases} \tag{16}$$

两路正弦形状的感应线圈拾取到的感应电压可以表示为：

$$\begin{cases}U_{c2}=k_2\sin(\omega t)\cos\left(\dfrac{2\pi}{W}x\right)\\ U_{s2}=k_2\cos(\omega t)\sin\left(\dfrac{2\pi}{W}x\right)\\ U_{O2}=U_{c2}+U_{s2}=k_2\sin\left(\omega t+\dfrac{2\pi}{W}x\right)\end{cases} \tag{17}$$



(a) 正视图
(a) Front view

(b) 俯视图
(b) Top view

图 7 传感器测量原理

Fig. 7 Sensor measurement principle

两路矩形的感应线圈拾取到的感应电压可以表示为：

$$\begin{cases}U_{c3}=k_3\sin(\omega t)\cos\left(\dfrac{2\pi}{W}x\right)\\ U_{s3}=k_3\cos(\omega t)\sin\left(\dfrac{2\pi}{W}x\right)\\ U_{O3}=U_{c3}+U_{s3}=k_3\sin\left(\omega t+\dfrac{2\pi}{W}x\right)\end{cases} \tag{18}$$

那么，传感器总的输出电压信号为指数形状的感应线圈拾取到的感应电压、正弦形状的感应线圈的感应电压与矩形线圈感应电压三者的叠加，很大程度上提高了传感器感应信号的幅值，可以表示为：

$$U_O=U_{O1}+U_{O2}+U_{O3}=\sum_{i=1}^{3}k_i\sin(\omega t+\theta)=\sum_{i=1}^{3}k_i\sin\left(\omega t+\frac{2\pi}{W}x\right) \tag{19}$$

从式(19)中可以看出，传感器的位移信息在 U_O 的相位中，当激励信号频率较大时，直接使用高频时钟插补鉴相会降低传感器测量时间差的分辨力。用信号产生模块再生成一路与激励信号频差为 ω_d 的解调信号 L 与传感器输出信号 U_O 相乘，可以得到混频信号 $U_{O\,mix}$。

$$L=\cos(\omega-\omega_d)t \tag{20}$$

$$U_{O\,mix}=U_O\times L=\sum_{i=1}^{3}k_i\sin\left(\omega t+\frac{2\pi}{W}x\right)\times\cos(\omega-\omega_d)t=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3}k_i\sin\left[(2\omega-\omega_d)t+\frac{2\pi}{W}x)\right]+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3}k_i\sin\left(\omega_d t+\frac{2\pi}{W}x\right) \tag{21}$$

通过带通滤波,过滤掉无关信号,此时传感器的输出信号变为:

$$V_{Out}(t,x)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{3}k_i\sin\left(\omega_d t+\frac{2\pi}{W}x\right) \tag{22}$$

方波信号可以分解成一系列的正弦波信号之和,其中解调信号 L 可以使用方波信号来实现,利用高频时钟插补行波信号 $V_{Out}(t,x)$ 和参考信号的相位差即可得到时间差 Δt。此时,传感器测量出的位移可以表示为:

$$X=NW+\Delta x=W\left(N+\frac{\omega_d\Delta t}{2\pi}\right) \tag{23}$$

其中,N 为传感器动尺相对于传感器定尺走过的节距数,Δx 为传感器动尺与传感器定尺之间的相对位移。

2.2　传感器信号处理

传感器信号处理过程如图 8 所示。给激励线圈通入激励电流,感应线圈通过电磁耦合得到感应电压信号 U_O,将传感器输出信号 U_O 和解调信号 L 相乘后的信号,通过带通滤波、运算放大、过零比较电路转换成方波信号。利用高频时钟插补方波信号和标准参考信号的相位差即可得到时间差 Δt,在微控制单元(microcontroller unit, MCU)中完成位移解算,最后通过串口将数据传送至上位机。

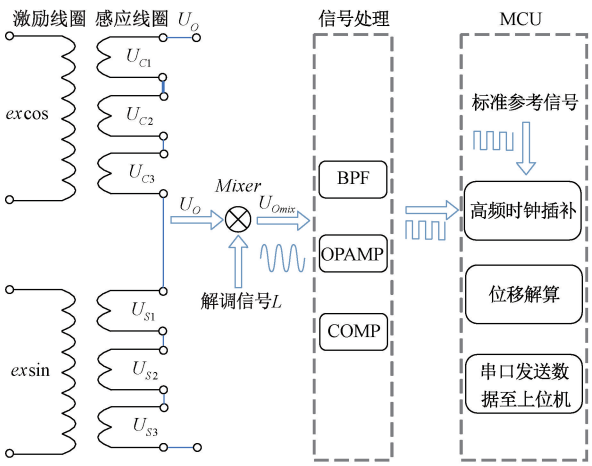


图 8　传感器信号处理

Fig. 8　Sensor signal processing

3　传感器电磁场仿真与误差分析

3.1　低频激励电磁场仿真与误差分析

利用三维建模软件对传感器进行三维建模,然后对模型进行电磁场有限元仿真,传感器仿真参数设置如表 1 所示。给传感器的 $ex\cos$ 激励线圈和 $ex\sin$ 激励线圈分别通入幅值为 0.1 A、频率为 10 kHz 的正余弦交变电流,感应线圈阻抗为 2 Ω。基体材料选用 Steel_1008,线圈材料选用 Copper,让传感器动尺相对于传感器定尺运动一个节距的位移,运动步距设置为 0.2 mm。

表 1　传感器仿真参数设置

Table 1　Sensor simulation parameter settings

仿真参数	设定值
激励电流幅值/A	0.1
激励电流频率/kHz	10
基体厚度/mm	1
激励线圈匝数	1
感应线圈匝数	1
激励线圈线宽/mm	0.1
感应线圈线宽/mm	0.1
基体材料	Steel_1008
线圈材料	Copper
传感器节距/mm	4
感应线圈阻抗/Ω	2
仿真距离/mm	4
运动步长/mm	0.2
仿真时长/μs	100
时间步长/μs	2

通过气隙磁场分层耦合的方式,将每一层的两路信号叠加在一起即可合成每一层所对应的感应行波信号;将 3 层耦合线圈的感应行波信号叠加在一起即为传感器最终的输出信号,传感器低频励磁电磁场仿真结果如图 9 所示。

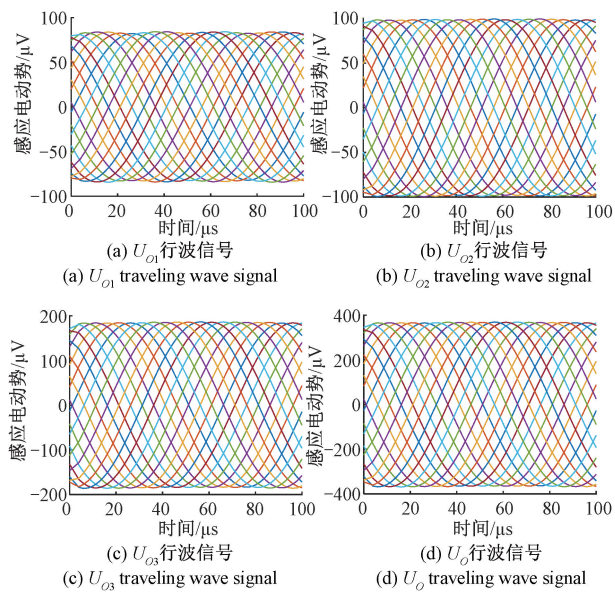
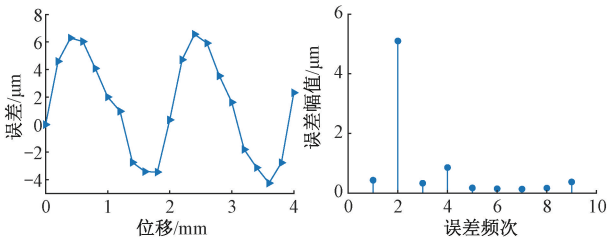


图 9　低频励磁电磁场仿真结果

Fig. 9　Simulation results of low-frequency excitation electromagnetic field

从图 9 中可以看出,传感器第 1 层输出信号 U_{O1} 幅值约为 83 μV,第 2 层输出信号 U_{O2} 幅值约为 98 μV,第 3 层输出信号 U_{O3} 幅值约为 185 μV,传感器电磁场仿真最终的信号输出 U_O 幅值约为 366 μV。相比于气隙磁场单层耦合的方式,传感器感应信号的幅值在原有的基础上提高了 97.8%,这和前文模拟仿真部分的结论基本一致。

传感器动尺相对于传感器定尺运动一个节距 4 mm,共采集 20 个点,分别对应 20 个位置。利用位移解算程序可以得到传感器的仿真误差曲线,对仿真误差曲线进行快速傅里叶变换可以得到传感器占主导的误差频次,传感器低频激励仿真误差如图 10 所示。



(a) U_O误差曲线
(a) Error curve U_O

(b) U_O误差频次
(b) Error frequency U_O

图 10 传感器低频激励仿真误差

Fig. 10 Sensor low-frequency excitation simulation error

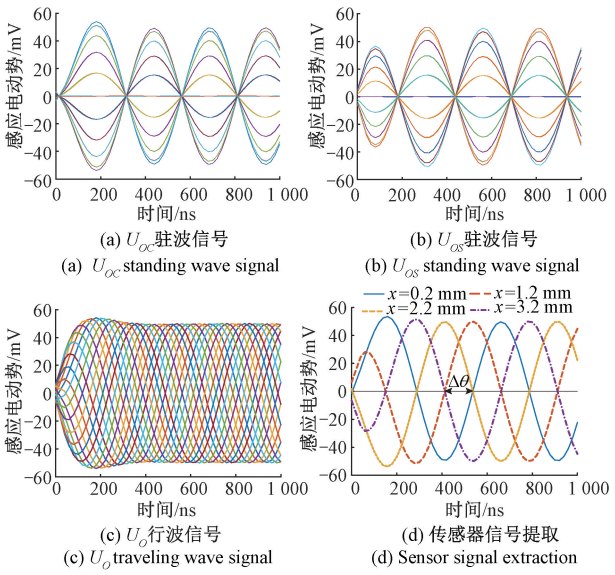
从图 10 中可以看出,采用气隙磁场分层耦合的方式,传感器的输出信号 U_O 的误差主要成分为二次误差,二次误差幅值为 5.1 μm,传感器在一个周期内的误差下降至±6.6 μm。与单层耦合的方式相比,传感器感应信号强度显著提高。

3.2 高频激励电磁场仿真与误差分析

为了进一步提高传感器的信噪比,增强其抗干扰的能力。对传感器在高频激励方式下进行电磁场仿真,保持其他参数不变,将激励信号频率提高至 2 MHz,传感器在 2 个时间周期内的高频励磁电磁场仿真结果如图 11 所示。

结合图 9 和 11 可以看出,传感器激励信号频率从 10 kHz 提高至 2 MHz 传感器感应信号幅值从 366 μV 提高至 40.9 mV,提高了将近 110 倍数,传感器感应信号幅值大幅度提升。通过瞬态电磁场仿真模拟,传感器在高频励磁方式下的感应信号在刚上电的短时间内信号幅值有一定的波动,但很快传感器信号幅值趋于稳定。提取图 11 中传感器在高频励磁方式下第 2 个时间周期内的行波信号进行误差分析,传感器高频激励仿真误差如图 12 所示。

从图 12 中可以看出传感器在高频激励方式下的主要误差频次仍然为 2 次误差,二次误差幅值为 5.9 μm。



(a) U_{OC}驻波信号
(a) U_{OC} standing wave signal

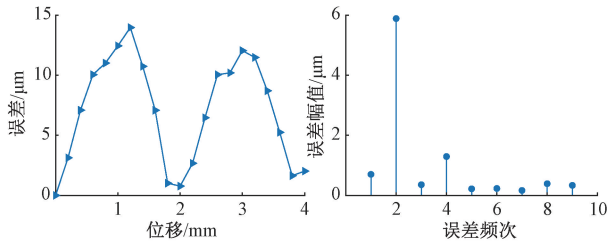
(b) U_{OS}驻波信号
(b) U_{OS} standing wave signal

(c) U_O行波信号
(c) U_O traveling wave signal

(d) 传感器信号提取
(d) Sensor signal extraction

图 11 高频励磁电磁场仿真结果

Fig. 11 High-frequency excitation electromagnetic field simulation results



(a) U_O误差曲线
(a) Error curve U_O

(b) U_O误差频次
(b) $U_O$error frequency

图 12 传感器高频激励仿真误差

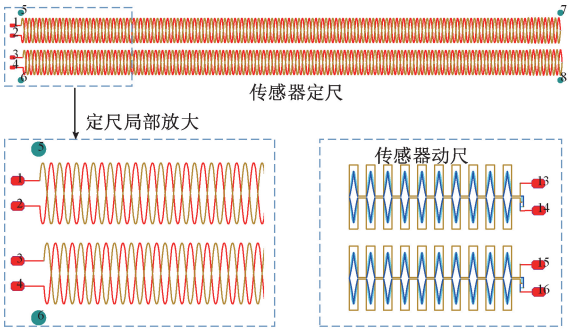
Fig. 12 Sensor high-frequency excitation simulation error

4 实验结果与分析

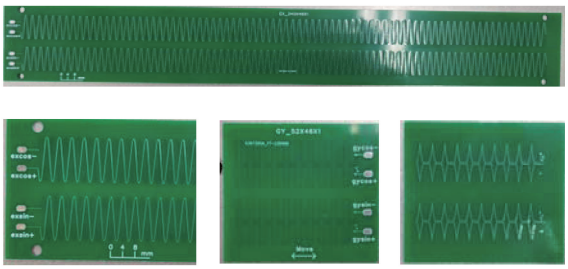
根据气隙磁场分层耦合原理,设计实验方案对传感器的性能进行测试,传感器样机制作如图 13 所示。传感器样机分为传感器定尺和传感器动尺两个部分,均采用四层印制线路板加工工艺,图 13(a)为传感器 PCB 走线示意图,图 13(b)为传感器样机实物。

传感器实验平台如图 14 所示。传感器输出的感应行波信号经过信号处理电路的处理,在 MCU 中完成位移解算后,通过串口将数据发送至上位机。光栅的位移测量数据作为真实值,时栅位移传感器的测量数据作为测量值,二者做差即可得到传感器的测量误差。

传感器输出的原始信号如图 15 所示。与低频激励方式相比,采用高频激励信号能够提高传感器感应信号的幅值,这与仿真实验部分得出的结论一致,当然,高频

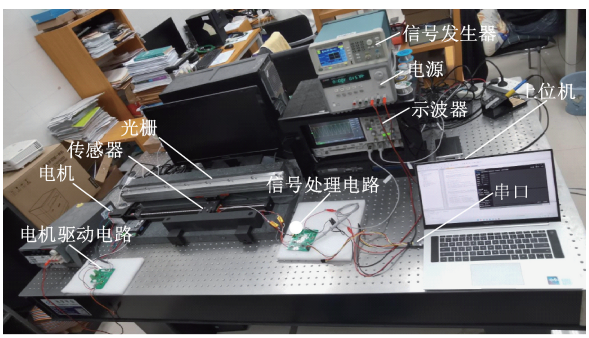


(a) 传感器样机PCB走线
(a) Sensor prototype PCB traces

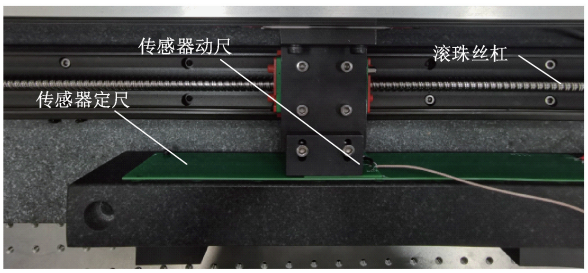


(b) 传感器样机实物图
(b) Actual diagram of the sensor prototype

图 13　传感器样机制作
Fig. 13　Sensor prototyping



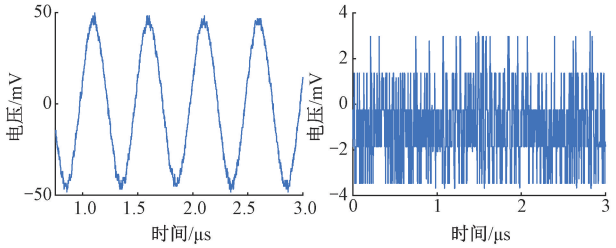
(a) 实验平台总体布局
(a) Overall layout of the experimental platform



(b) 传感器的安装
(b) Installation of the sensor

图 14　传感器实验平台
Fig. 14　Sensor experiment platform

工作模式对硬件电路的性能提出了更高的要求。从图 15 中可以看出传感器原始信号幅值达到了 49.8 mV，其中混杂了干扰噪声，需要对其进行差分放大来抑制共模干扰，然后滤波处理后才能与解调信号混频。

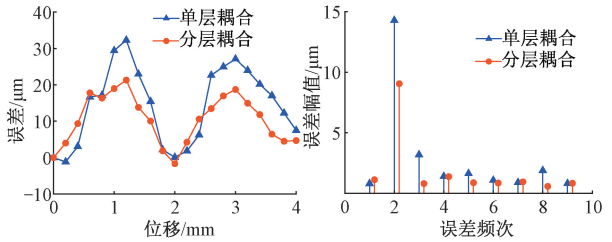


(a) 传感器原始感应信号
(a) The raw sensing signal of the sensor

(b) 传感器干扰信号
(b) Sensor interference signals

图 15　传感器原始信号
Fig. 15　Sensor raw signal

对采用气隙磁场分层耦合测量原理的传感器样机进行误差测试，气隙磁场分层耦合误差测试结果如图 16 所示。



(a) 误差曲线
(a) Error curve

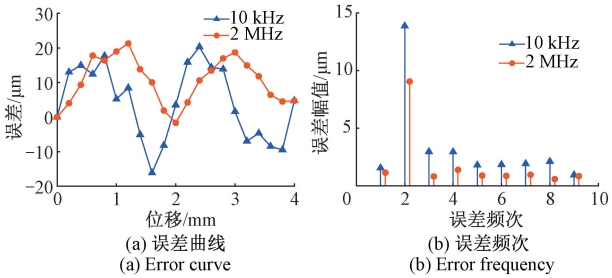
(b) 误差频次
(b) Error frequency

图 16　气隙磁场分层耦合误差测试结果
Fig. 16　Air gap magnetic field stratified coupling error test results

从图 16 中可以看出，采用气隙磁场分层耦合测量原理的传感器主要误差成分为二次误差，和模拟仿真结果一致。与单层耦合方式相比，传感器在一个周期内的二次误差幅值由 14.3 μm 下降至 9.1 μm，误差峰峰值从 33.4 μm 下降至 22.9 μm。采用气隙磁场分层耦合结构提高了传感器的感应信号幅值，传感器的测量精度在原有的基础上提高了 31.4%。

对不同工作频率状态下的传感器进行误差测试实验，传感器在不同激励频率下的误差测试结果如图 17 所示。从图 17 中可以看出相对于 10 kHz 的低频信号驱动方式，采用的高信噪比和高时间插补分辨力测量方法，传感器在一个周期内的二次误差幅值从 13.9 μm 下降至 9.1 μm，误差峰峰值从 36.5 μm 下降至 22.9 μm，传感器的测量精度在原有的基础上提高了 37.3%。

让传感器动尺相对于传感器定尺在 0~200 mm 内运动，采样 100 个点，利用误差修正算法对传感器的原始测量误差进行补偿，传感器误差补偿后的误差曲线如图 18 所示。



(a) 误差曲线
(a) Error curve

(b) 误差频次
(b) Error frequency

图 17 传感器在不同激励频率下的误差测试结果

Fig. 17 Error test results of sensors at different excitation frequencies

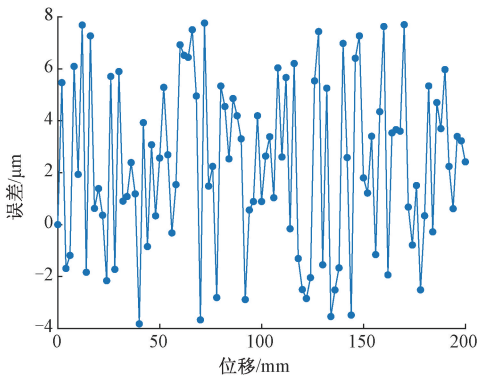


图 18 传感器误差补偿后的误差曲线

Fig. 18 Error curve after sensor error compensation

从图 18 中可以看出,经过误差补偿后,传感器在 200 mm 内的误差峰峰值下降至 11.6 μm。

5 结 论

为了提高电磁式直线时栅位移传感器的信噪比,本文建立传感器气隙磁场数学模型,研究了平面线圈气隙磁场分层耦合原理,提出了一种基于气隙磁场分层耦合的新型传感器测量模型。另外,针对电磁式时栅位移传感器高信噪比和高时间插补分辨力难以兼顾的问题,通过提高激励信号频率的方式提高传感器的信噪比,将高频感应信号调制成低频感应信号输出,有效避免了高频时钟插补高频感应信号会降低传感器分辨力的问题,提出了一种具有高信噪比、高时间插补分辨力的测量新方法。通过仿真实验发现,与气隙磁场单层耦合的方式相比,采用气隙磁场分层耦合的方式传感器感应信号的幅值在原有的基础上提高了 97.8%;传感器激励信号频率从 10 kHz 提高至 2 MHz 传感器感应信号幅值从 366 μV 提高至 40.9 mV,提高了将近 110 倍数,传感器感应信号幅值大幅度提升。最后,研制了基于气隙磁场分层耦合的直线时栅位移传感器样机,并搭建实验平台对其性能进行了测试。实验结果表明,采用气隙磁场分层耦合结构增强了传感器的感应信号强度,传感器的测量精度在原有的基础上提高了 31.4%;采用的高信噪比和高时间插补分辨力测量方法,传感器的测量精度在原有的基础上提高了 37.3%。

参考文献

[1] 秦毅,王阳阳,彭东林,等. 电感式角位移传感器技术综述[J]. 仪器仪表学报,2022,43(11):1-3.
QIN Y, WANG Y Y, PENG D L, et al. Review of inductive angular displacement sensor technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 1-3.

[2] 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 X, LI SH H, MA Q L, et al. Review of development of grating precision displacement measurement technology [J]. Chinese Optics, 2019, 12(4):741-742.

[3] SUN B, ZHENG G, ZHANG X X, et al. Development of contact displacement sensor based on frequency-modulated continuous-wave [J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(19): 1492-1494.

[4] 王淑娴,彭东林,吴治峄,等. 伺服电机位置检测技术综述[J]. 仪器仪表学报,2018,39(8):143-144.
WANG SH X, PENG D L, WU ZH Y, et al. Review of servo motor position detection technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8):143-144.

[5] PENG K, YU Z C, LIU X K, et al. Features of capacitive displacement sensing that provide high-accuracy measurements with reduced manufacturing precision [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7377-7386.

[6] FAN X C, YU Z C, PENG K, et al. A compact and high-precision capacitive absolute angular displacement sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(19): 11173-11174.

[7] 朱革,余小雨,付敏,等. 高精度自适应数字移相方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(2):107-111.
ZHU G, YU X Y, FU M, et al. Research on high-precision adaptive digital phase shifting method [J]. Journ-al of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2):107-111.

[8] 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):97-98.
LIU X K, MEI X F, PU H J, et al. Design of high-precision reflective absolute nano-time gate displacement

sensor based on time-sharing method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2021,42(9):97-98.

[9] 刘小康,柳康,蒲红吉,等. 基于二次调制的高精度多圈绝对式时栅角位移传感器[J]. 仪器仪表学报,2021,42(5):90-93.
LIU X K, LIU K, PU H J, et al. High-precision multiturn absolute time gate angle displacement sensor based on secondary modulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2021,42(5):90-93.

[10] RAHAL M, DEMOSTHENOUS A. An integrated signal conditioner for high-frequency inductive position sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 21(1): 015203.

[11] DJURIC S M. Performance analysis of a planar displacement sensor with inductive spiral coils[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(4): 1-4.

[12] ASCHENBRENNER B, ZAGAR B G. Analysis and validation of a planar high-frequency contactless absolute inductive position sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 64(3): 768-775.

[13] 鲁进,陈锡侯,汤其富,等. 变耦型时栅传感器及测头姿态对测量误差的影响[J]. 光学 精密工程,2016,24(9):2271-2273.
LU J, CHEN X H, TANG Q F, et al. Influence of variable coupling time gate sensor and probe attitude on measurement error[J]. Optics and Precision Engineering, 2016,24(9):2271-2273.

[14] WANG S X, WU Z Y, PENG D L, et al. An angle displacement sensor using a simple gear[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 270: 245-246.

[15] 杨继森,卢渝,吴灼,等. 可抑制端部效应的平面磁场式直线时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报,2022,43(4):89-91.
YANG J S, LU Y, WU ZH, et al. Gate displacement sensor with planar magnetic field linear time to suppress end effect[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4):89-91.

[16] 武亮,彭东林,鲁进,等. 基于平面线圈线阵的直线时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报,2017,38(1):83-95.
WU L, PENG D L, LU J, et al. Linear time gate displacement sensor based on planar coil line array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(1):83-95.

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, M. Sc. degree from Chongqing University in 2003, and Ph. D. degree from Chongqing University in 2007. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision measurement and intelligence sensor.

熊浩,2021 年于重庆理工大学获得学士学位,现为重庆理工大学硕士研究生,主要研究方向为智能仪器与传感器。
E-mail: xionghao@ stu. cqut. edu. cn

Xiong Hao received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2021. He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensors.