

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209312

可抑制端部效应的平面磁场式直线时栅位移传感器*

杨继森, 卢 渝, 吴 灼, 周 润, 张 迪

(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:针对前期研制平面磁场式直线时栅位移传感器存在的端部效应致使匀速运动坐标系均匀度降低的问题,提出了一种抑制平面线圈端部效应的方法,构建均匀性更高的交变磁场,并研制出了一种可抑制端部效应的新型平面直线时栅位移传感器。建立了平面线圈励磁数学模型,分析端部效应对均匀磁场的影响程度,提出了双层互补式激励线圈结构抑制端部效应方案;建立了新型平面直线时栅位移测量模型,采用空间正交的双列激励单元,实现了行波信号的合成并通过仿真验证了方案的有效性;建立了仿真模型,分析端部效应对传感器测量精度的影响,并优化传感器参数;基于 PCB 工艺制造了量程为 228 mm 的新型传感器样机并与传统传感器样机展开了对比实验,实验结果表明,新型平面直线时栅位移传感器能够有效地抑制传感器的端部效应,提高测量精度,传感器对极内原始测量精度从 $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ 提高到 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词:端部效应;均匀磁场;直线时栅位移传感器;误差特性

中图分类号: TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Planar magnetic field linear time-grating displacement sensor with end-effect suppression

Yang Jisen, Lu Yu, Wu Zhuo, Zhou Run, Zhang Di

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

Abstract: Aiming at the problem that the uniformity of the uniform motion coordinate system is reduced due to the end effect of the planar magnetic field linear time-grid displacement sensor developed in the early stage, a method for suppressing the end effect of the planar coil is proposed, and an alternating magnetic field with higher uniformity is constructed. A new type of plane linear time grating displacement sensor that can suppress the end effect is developed. A mathematical model of planar coil excitation is formulated to analyze the influence of the end effect on the uniform magnetic field, and a double-layer complementary excitation coil structure is proposed to suppress the end effect. The dual-column excitation unit realizes the synthesis of travelling wave signals and verifies the effectiveness of the scheme through simulation. A simulation model to analyze the influence of the end effect on the measurement accuracy of the sensor is established, and the sensor parameters are optimized. Based on the PCB process, a new sensor prototype with a measuring range of 228 mm is fabricated and compared with the traditional sensor prototype. Experimental results show that the new planar linear time grating displacement sensor can effectively suppress the end effect of the sensor and improve the measurement accuracy. The intrapolar raw measurement accuracy is improved from $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ to $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$.

Keywords: end-effect; uniform magnetic field; linear time-grating displacement sensor; error characteristic

0 引 言

精密直线位移测量技术广泛应用于机器人、半导体器件制造、航空和军事等各个精密运动控制领域^[1-2]。国

内外学者针对精密直线位移测量展开了大量研究,主要可以分为光电式、电容式和电磁式位置传感器^[3]。光电式位置传感器具有高精度、高分辨率的特性,业界龙头 Heidenhain 公司的 LIP 系列光栅尺精度可达到 $\pm 0.14\text{ }\mu\text{m}$, 然而其栅距亦达到了 $0.512\text{ }\mu\text{m}$ ^[4], 可见光栅

收稿日期: 2022-02-18 Received Date: 2022-02-18

* 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、重庆理工大学研究生创新项目(cjgyx 20203107)资助

尺的测量精度严重依赖于超精密光栅栅距的质量,极细、极均匀的栅距给制造带来挑战的同时也增加了制造成本。电容式位置传感器具有结构简单、低功耗的优势,文献[5]采用电容阵列作为传感单元,通过电容的周期性变化实现位移测量,测量精度可达 $\pm 0.2 \mu\text{m}$,文献[6]利用电容测量原理,实现角位移和直线位移组合测量,且线性度达0.9%。但电容会随着温度、湿度、周围材料和外界异物的不同而变化,这使得研发一个稳定的、高精度的位置传感器具有挑战性。电磁式位置传感器有文献[7]设计磁致伸缩直线位移传感器采用铜环精确控制动态磁场范围,其测量精度为 $\pm 25 \mu\text{m}$,文献[8]基于电磁感应现象设计直线位移传感器精度达 $\pm 15 \mu\text{m}$ 。电磁式位置传感器对外来物质更具容忍性,抗干扰能力强,但其测量精度较低。

时栅位移传感器不同于上述传感器,其最主要思想为构建一个匀速运动坐标系,利用匀速运动坐标系建立时间量和空间量的关系,从而利用时间量去测量空间量^[9-10]。时栅测量精度与匀速运动坐标系质量息息相关,同时,磁场式时栅具有稳定性高、抗干扰能力强的特点。

原有时栅直线位移传感器通过在导磁体等分开槽,并在槽内嵌入激励线圈,形成空间均匀磁场,感应线圈通过电磁耦合获得行波信号,经过整形后用高频时钟脉冲插补得到位移量^[11]。然而采用机加工开槽不均将引起磁场突变,从而影响传感器测量精度^[12-13]。近年来,提出了利用PCB线圈代替机械绕线,并结合时变磁场精确约束方法,抑制了部分“槽式”结构时栅位移传感器存在的齿槽效应引起磁场不均的问题^[14-15]。但是将线圈和导磁体设计成平面结构,采用PCB工艺走线代替传统绕线会引入端部效应导致磁场均匀度降低,影响感应信号稳定性,进而影响传感器测量精度^[16-19]。

针对上述问题,本文提出了一种抑制平面线圈端部效应的方法,构建均匀性更高的交变磁场,并研制出了一种新型平面直线时栅位移传感器。传感器基于激励线圈的电磁产生机理,采用双层互补式线圈作为传感器的磁场激励,将激励磁感应强度提升1倍的同时从原理层面消除了端部效应对磁场均匀度的影响。增强传感器“电—磁—电”的耦合强度和磁场均匀度,提高信号质量,从而提高传感器的测量精度。

1 平面线圈端部效应及其抑制原理

1.1 平面线圈端部效应

在矩形线圈中通入电流 I ,根据电磁场基础理论,平面线圈上方任意一点 $M(x, y, z)$ 沿 z 方向的磁感应强度为4条有限长导线 AB 、 BC 、 CD 、 DA 在点 M 产生的磁场叠加而成。

$$B_z = B_{ABz} + B_{BCz} + B_{CDz} + B_{DAz} \quad (1)$$

分析导线 AB 段,基于毕奥-萨伐尔定律,在 AB 段截取电流元 $d\vec{l}$, AB 段在点 M 产生的磁感应强度是电流元 $d\vec{l}$ 在点 M 沿 AB 积分的结果:

$$B_{AB} = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{AB} \frac{d\vec{l} \times \vec{NM}}{|\vec{NM}|^3} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{1}{|\vec{NM}|^2} \int_{\theta_1}^{\pi-\theta_2} \sin\theta dl \quad (2)$$

式中: μ_0 是真空磁导率; L 表示 N 到 M 的最短距离。由图1可知如下几何关系:

$$l = \frac{L}{\tan\theta} \quad (3)$$

$$|\vec{NM}| = \frac{L}{\sin\theta} \quad (4)$$

$$L = \sqrt{(a-x)^2 + z^2} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \cos\theta_1 = \frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2 + (a-x)^2 + z^2}} \\ \cos\theta_2 = \frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2 + (a-x)^2 + z^2}} \end{cases} \quad (6)$$

将式(3)、(4)代入式(2)并化简可得:

$$B_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi L} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (7)$$

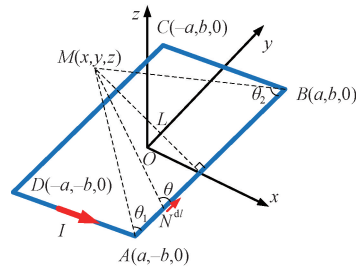


图1 矩形线圈磁场计算模型

Fig. 1 Calculation model of rectangular coil magnetic field

由于传感器激励线圈和感应线圈正对平行,此处分析垂直于线圈所在平面的磁感应强度。联立式(5)~(7)求得磁感应强度沿着 z 轴分布的磁感应强度的分量 B_{ABz} 为:

$$B_{ABz} = \frac{\mu_0 I(a-x)}{4\pi[(a-x)^2 + z^2]} \times \left[\frac{b+y}{\sqrt{(b+y)^2 + (a-x)^2 + z^2}} + \frac{b-y}{\sqrt{(b-y)^2 + (a-x)^2 + z^2}} \right] \quad (8)$$

同理可分析 BC 、 CD 、 DA 段,求得 B_{BCz} 、 B_{CDz} 、 B_{DAz} 。根据式(1)可求得点 M 沿 z 轴的磁感应强度。取矩形线圈

宽度 $2a=2\text{ mm}$, 线圈长度 $2b=15\text{ mm}$, 通以电流 0.1 A , 求得矩形线圈上方 $z=0.5\text{ mm}$ 平面的磁场分布。

计算结果表明, 在 $2\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的平面矩形线圈内通入 0.1 A 的激励电流, 可在平行于平面矩形线圈 $z=0.5\text{ mm}$ 平面处产生均匀磁场区域。在区域 $x\in[-0.6, +0.6]$, $y\in[-6, +6]$ 磁感应强度约为 $3.28\times 10^{-8}\text{ T}$, 且近似均匀分布, 由此获得面积为 14.4 mm^2 的均匀磁场区域。如图2所示, 区域 P_1 、 P_2 为端部所在区域, 该区域磁感应强度约为 $3.93\times 10^{-8}\text{ T}$, 破坏了均匀磁场, 致使均匀磁场面积占矩形线圈区域比例仅为 48% 。将此种由于端部所导致的均匀磁场破坏的现象称之为“端部效应”。

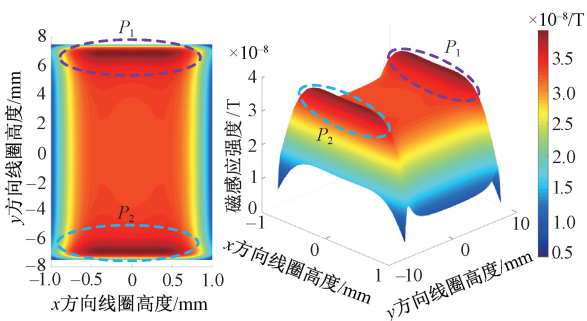


图2 矩形线圈磁场分布

Fig. 2 Magnetic field distribution of rectangular coil

前期研制平面磁场式直线时栅位移传感器结构如图3所示, 其线圈采用“一线式”结构, 沿“几”字形阵列布置于同一平面。此种布线方案减少过孔, 避免电流流经过多过孔带来的局部干扰。

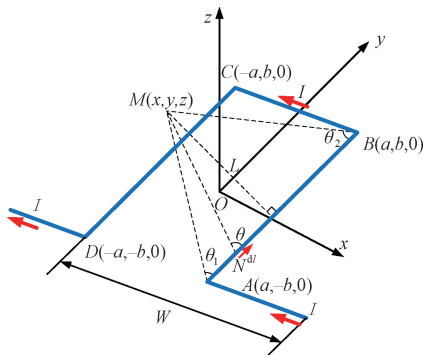


图3 “几”字形线圈磁场计算模型

Fig. 3 Calculation model of magnetic field of “几” shaped coil

图3中通电线圈上方某点 M 沿 z 方向的磁感应强度为3条有限长导线 AB 、 BC 、 CD 在点 M 产生的磁场叠加而成。

$$B_z = B_{ABz} + B_{BCz} + B_{CDz} \quad (9)$$

对“几”字形矩形线圈磁场分布进行数值仿真。取线圈宽度 $2a=2\text{ mm}$, 线圈长度 $2b=15\text{ mm}$, 通以电流

0.1 A , 求取线圈平面高度 $z=0.5\text{ mm}$ 平面的磁场分布。

如图4所示, 在平面 $z=0.5\text{ mm}$, 区域 $x\in[-0.5, +0.5]$, $y\in[-5, +5]$ 磁感应强度约为 $3.21\times 10^{-8}\text{ T}$, 且近似均匀分布, 其获得面积为 10 mm^2 的均匀磁场区域。区域 P_3 为端部所在区域, 该区域磁感应强度约为 $3.91\times 10^{-8}\text{ T}$, 该区域破坏了均匀磁场。此外, “几”字形线圈不同于矩形线圈, 其还破坏了 y 方向对称结构, 致使均匀磁场区域进一步被破坏, 导致均匀磁场面积仅占线圈面积的 33.3% , 这严重影响了线圈的励磁效果, 从而降低感应信号质量。

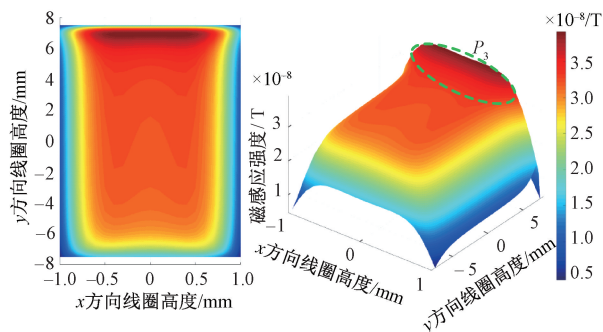


图4 “几”字形线圈磁场分布

Fig. 4 Magnetic field distribution of “几”-shaped coil

1.2 端部效应抑制机理

欲抑制“端部效应”对均匀磁场带来的破坏, 最易想到的便是取消端部线圈或将端部线圈经过孔连接至下层区域, 并在上下层之间增加屏蔽层。

如图5所示, 通电线圈上方某点 M 沿 z 方向的磁感应强度为2条有限长导线 AB 、 CD 在点 M 产生的磁场叠加而成。

$$B_z = B_{ABz} + B_{CDz} \quad (10)$$

对两线式线圈磁场分布进行数值仿真。取线圈宽度 $2a=2\text{ mm}$, 线圈长度 $2b=15\text{ mm}$, 通以电流 0.1 A , 求取线圈平面高度 $z=0.5\text{ mm}$ 平面的磁场分布。

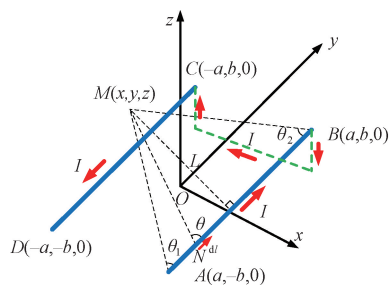


图5 两线式线圈磁场计算模型

Fig. 5 Calculation model of two-wire coil magnetic field

如图6所示, 在 $z=0.5\text{ mm}$ 平面, 区域 $x\in[-0.5, +0.5]$, $y\in[-5, +5]$ 磁感应强度约为 $3.18\times 10^{-8}\text{ T}$, 且近

似均匀分布,其获得面积为 10 mm^2 的均匀磁场区域。此方案可抑制端部效应,但均匀磁场面积仅占线圈面积的 33.3%。此外,该方案会引入 z 方向走线(过孔),电流流经过孔亦会激励磁场从而会影响均匀磁场。

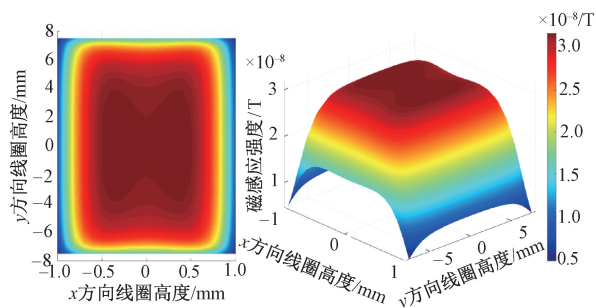


图6 两线式线圈磁场分布

Fig. 6 Magnetic field distribution of two-wire coil

为了有效地解决该问题,本研究中提出一种双层互补式激励线圈结构抑制端部效应方案。基于 PCB 多层加工工艺,以“几”字形线圈为基础,构建双层互补式结构。

如图 7 所示,忽略上下层线圈细小间距,线圈上方某点 M 沿 z 方向的磁感应强度为:

$$B_z = 2 \times B_{ABz} + B_{BCz} + 2 \times B_{CDz} + B_{DAz} \quad (11)$$

以 x 正方向为电流正方向,上层线圈通入电流 0.1 A ,下层线圈通入电流 -0.1 A ,求取线圈平面高度 $z=0.5 \text{ mm}$ 平面的磁场分布。

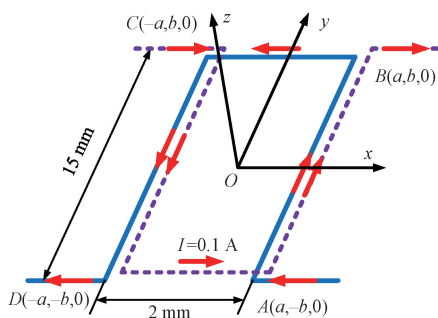


图7 双层互补式线圈磁场计算模型

Fig. 7 Calculation model of double-layer complementary coil magnetic field

如图 8 所示,在 $z=0.5 \text{ mm}$ 平面,区域 $x \in [-0.7, +0.7]$, $y \in [-7, +7]$ 磁感应强度约为 $6.41 \times 10^{-8} \text{ T}$,且近似均匀分布,其获得面积为 19.6 mm^2 的均匀磁场区域,占激励线圈面积的 65.3%,其抑制端部效应的同时均匀磁场的占有率显著提升。此外,相较前期研制线圈,其磁感应强度提升 1 倍左右,有利于提高感应信号的信噪比。

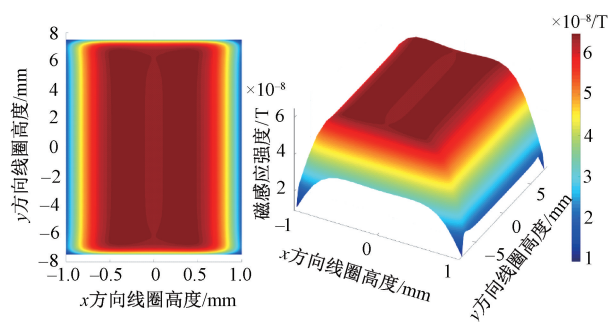


图8 双层互补式线圈磁场分布

Fig. 8 Magnetic field distribution of double-layer complementary coil

以双层互补式线圈为基础,可构建连续的高均匀度磁场阵列,并以高均匀度阵列参考系为基准设计位移传感器。图 2、4、6 和 8 均只仿真一个矩形单元,设两个矩形单元为一个节距 W ,且 $W=4 \text{ mm}$,取两个节距 $2W=8 \text{ mm}$,仿真双层互补式线圈的磁场分布情况如图 9 所示。

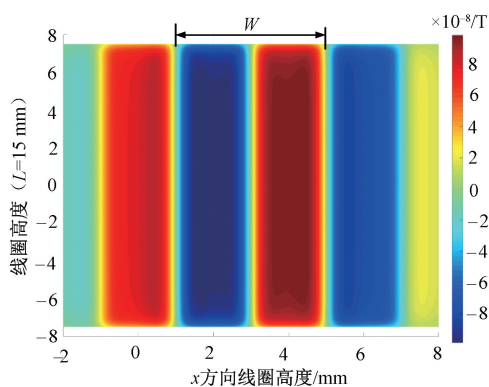


图9 双层互补式连续线圈磁场分布

Fig. 9 Magnetic field distribution of double-layer complementary continuous coil

单个矩形单元内颜色分布均匀,表征单个矩形单元内磁感应强度大小近似相等,近似均匀磁场,由此基于双层互补式线圈可构建连续的高均匀度磁场阵列。

2 传感器测量原理

图 10 所示为单矩形单元内电磁耦合模型,其中包括激励线圈和感应线圈,两者均采用双层互补式结构。某时刻激励电流如图 10 所示,可生成 z 方向的均匀磁场(图 8)。感应线圈可拾取均匀磁场,若使均匀磁感应强度发生变化或感应线圈相对激励线圈产生 x 方向位移,则感应线圈磁通量会发生变化从而生成感应电动势。

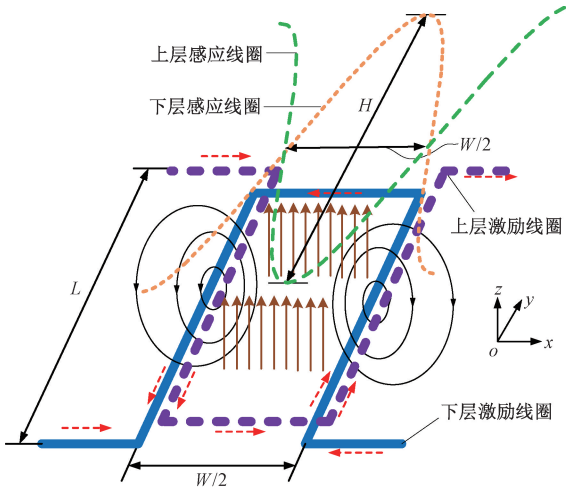


图10 单矩形单元内电磁耦合模型

Fig. 10 Electromagnetic coupling model in single rectangular element

将单矩形单元沿 x 方向延展,激励线圈相邻两个矩形单元电流方向相反,故两相邻单元均匀磁场方向相反(图9)。通入交变电流 I_s 于激励线圈,系统可生成均匀的时变磁场 B_s 。

$$I_s = A \sin \omega t \quad (12)$$

$$B_s = K \sin \omega t \quad (13)$$

式中: K 为比例系数; A 为激励信号幅值。

以图9所示位置为起点,感应线圈向右(取正)移动距离 x ,由于磁通连续,形成感应线圈内磁通量可表示为:

$$\phi_s(t, x) = k_\phi \sin \omega t \cos \frac{2\pi x}{W} \quad (14)$$

式中: W 表示节距或者周期; k_ϕ 为比例系数,与互感系数、阻抗、匝数以及感应线圈面积等原因有关。

由式(14)可知,磁通是一个关于时间 t 和位移 x 的函数。基于电磁感应定律可求得感生电动势 e_s 。

$$e_s(t, x) = k_1 \cos \omega t \cos \frac{2\pi x}{W} \quad (15)$$

设计传感器模型如图11所示,模型整体采用双列结构,激励线圈包括正弦激励线圈和余弦激励线圈,且正、余弦激励线圈在 x 方向相距 $1/4W$,感应线圈与激励线圈正对平行。

根据图11所示传感器结构, S 感应线圈输出感生电动势如式(15)所示。 C 感应线圈输出感生电动势同理可求:

$$e_c(t, x) = k_1 \sin \omega t \sin \frac{2\pi x}{W} \quad (16)$$

式(15)和(16)是在时间和空间相位上相差 90° 的驻波信号,感应线圈输出信号为二者之间的叠加。

$$U_o = e_c + e_s = k_1 \cos \left(\omega t - \frac{2\pi x}{W} \right) \quad (17)$$

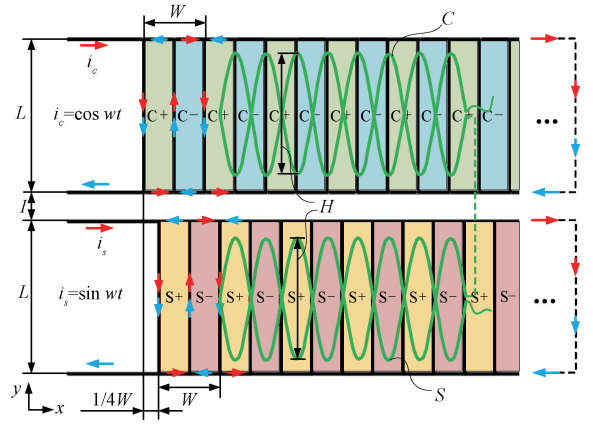


图11 传感器模型

Fig. 11 Sensor model

感应信号 U_o 和激励信号 i_s, i_c 同频率,且相位随着感应线圈的运动发生周期性变化, U_o 是一个反映时间量和空间量的行波信号。可通过行波信号 U_o 的相位变化反推位移量 x ,即可通过时间变化量 Δt 求得空间位移变化量 Δx 。

$$\Delta x = W \frac{\omega}{2\pi} \Delta t \quad (18)$$

3 建模仿真与误差分析

3.1 建模仿真

建立图11的三维仿真模型,模型参数设置如表1所示。传感器重复周期(节距) $W = 4 \text{ mm}$,动尺运动一个节距,感应信号正好变化一个周期。步距设置为 0.2 mm ($W/20 = 0.2 \text{ mm}$),每个步距都对应一条感应电动势曲线($e-t$),因此,仿真结果包含20个位置信息的输出信号。

两路激励信号 i_s, i_c 频率 $f = 10 \text{ kHz}$,即激励信号周期 $T = 100 \mu\text{s}$,故设置仿真时长为 $t = 100 \mu\text{s}$,这样设置保证了感应线圈在每个位置上都能获得一个完整周期的感应信号,在一个信号内取50个点,对应仿真求解时间间隔 $\Delta t = 2 \mu\text{s}$ ($T/50 = 2 \mu\text{s}$)。

传感器输出驻波信号如图12所示,图12(a)所示为感应线圈 C 输出感应电动势,其输出信号与式(16)相符,图12(b)所示为感应线圈 S 输出感应电动势,输出信号与式(15)相符。此外,从驻波仿真结果可知,感应线圈 C, S 的最大幅值均为 $\pm 300 \mu\text{V}$,并且两路信号存在 $T/4$ 相位差,满足合成行波的条件。

图13(a)所示为传感器输出行波信号(即感应线圈 C 和 S 输出信号叠加),其输出信号与式(17)相符,行波信号包括20个位置的信号曲线,行波幅值约为 $\pm 300 \mu\text{V}$,和两路驻波信号幅值相等。图13(b)所示为传感器输出行波信号在区域 $x \in [10, 50], y \in [-150, +150]$ 的局部放大图,

表 1 传感器仿真参数设置

Table 1 Sensor simulation parameter settings

参数名	参数值
激励电流幅值/A	0.1
激励电流频率/kHz	10
激励线圈匝数/匝	1
感应线圈匝数/匝	1
激励线圈间距/mm	0.5
感应线圈间距/mm	0.2
气隙间隙/mm	0.4
节距/mm	4
步距/mm	0.2
线圈宽度/mm	2
激励线圈长度/mm	15
感应线圈长度/mm	8
线圈直径/mm	0.1
线圈材料	Copper
导磁体材料	Steel_1008
基体厚度/mm	1
时长/ μs	100
时间间隔/ μs	2

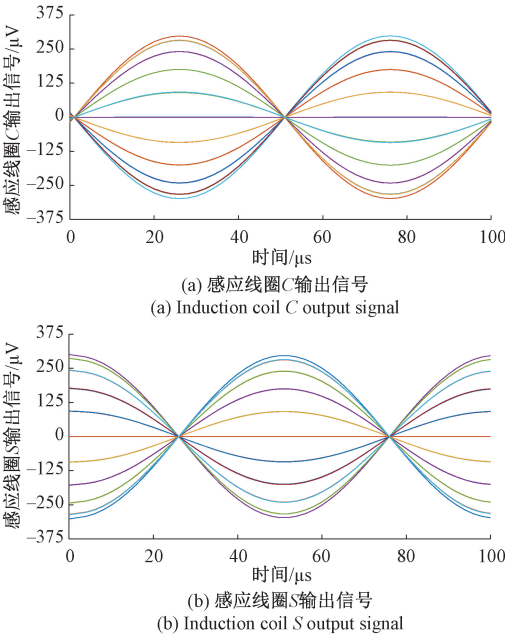


图 12 驻波信号

Fig. 12 Standing wave signal

可知各相邻曲线之间的相位差近似相等,相距 Δx ,反映出行波的相位随空间位置变化而变化,并且近似呈线性关系。

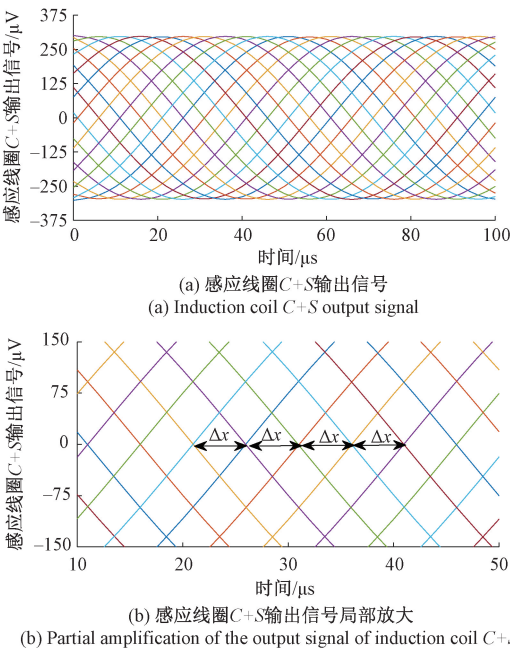


图 13 行波信号

Fig. 13 Traveling wave signal

3.2 数值分析

分别建立单层“几”字形激励线圈模型(图 3)和双层互补式激励线圈模型(图 7),感应线圈长度 H 均分别取值 8、10、12、14 mm,其余参数参考表 1,建立仿真模型,进而展开对比仿真。

图 14 所示为单层激励线圈传感器模型和双层激励线圈传感器模型在不同 H 取值时感应行波信号幅值对比,可知相较于单层激励线圈,采用双层互补式激励线圈结构可获得幅值更强的行波信号。此外, H 取值更大的感应线圈可感应更强行波信号。

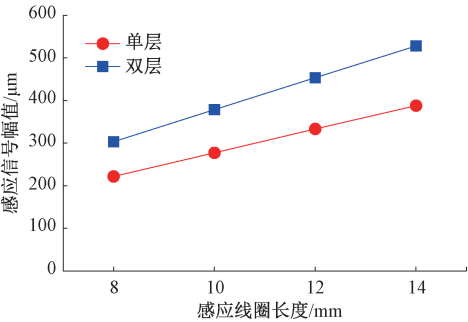


图 14 感应信号幅值对比

Fig. 14 Induction signal amplitude comparison

仿真结果类似于图 13,行波信号对应 20 组行波数据,每组数据相位信息可对应位移信息。利用快速傅里叶变换(FFT)提取 20 组行波数据相位,基波相位为仿真相位 α_s ,理论相位表示为 α_t ,根据式(17)可求得相位与

位移之间关系如式(19),进一步求得仿真位移 Δx_s 、理论位移 Δx_t ,从而求得测量误差 δ 。

$$\Delta x = \alpha \times \frac{W}{2\pi} \quad (19)$$

$$\delta = \Delta x_s - \Delta x_t \quad (20)$$

图15所示为单层激励线圈传感器模型和双层激励线圈传感器模型分别在不同 H 值的对极内($W=4$ mm)误差对比,可知单层激励线圈传感器模型在 $H=8, 10$ mm时,误差约为 ± 10 μm ,在 $H=12$ mm对应误差为 ± 13 μm ,在 $H=14$ mm对应误差为 ± 16 μm 。双层激励线圈传感器模型在 H 取值8、10、12、14 mm时误差相当约为 ± 7 μm 。

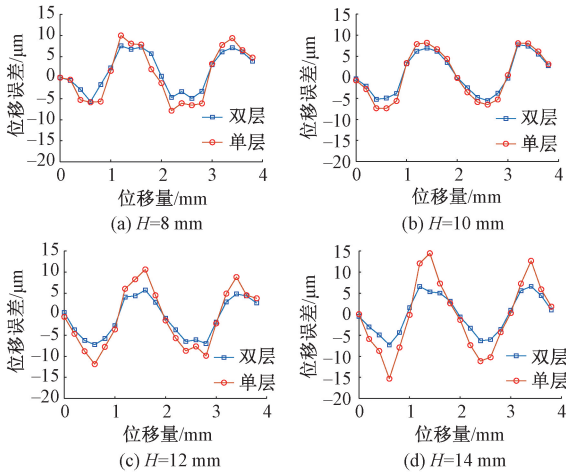


图15 位移测量误差对比

Fig. 15 Comparison of displacement measurement errors

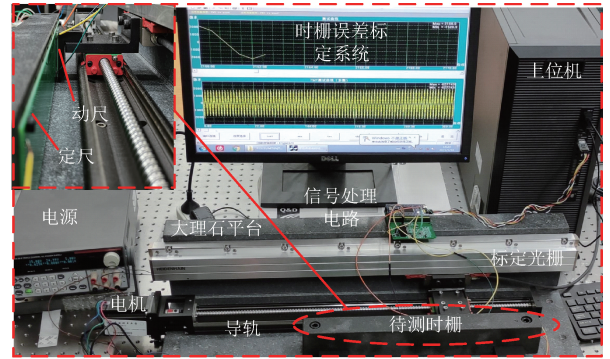
综合分析仿真结果,根据单层激励线圈均匀磁场区域(图4),当单层传感器模型在 $H=8, 10$ mm时,感应线圈置于均匀磁场内部,其误差范围较窄,当单层传感器模型在 $H=12, 14$ mm时,感应线圈除包含均匀磁场外还包含了由端部效应引起的磁场突变区域 P_3 ,从而影响测量精度, $H=14$ mm时包含更多 P_3 区域,其影响程度更加明显。根据双层激励线圈磁场分布(图8),该结构消除了端部效应带来的影响,并获得了均匀度更高、面积更大的均匀磁场面积,其仿真精度不受 H 取值影响且精度较高,这从仿真层面上验证了可抑制端部效应的传感器测量原理的可行性,也为后续实验分析提供基础。

4 实验验证

4.1 实验平台搭建

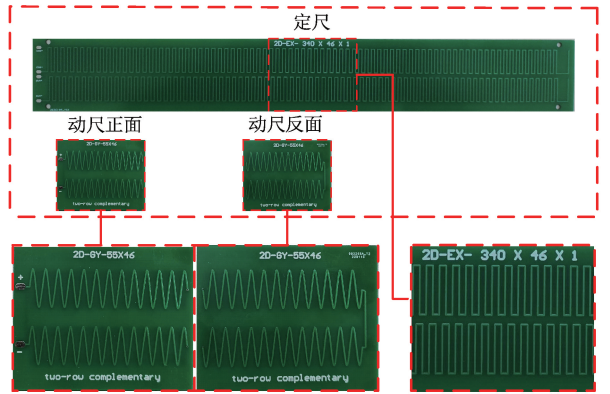
为测试传感器样机性能,搭建图16(a)所示实验平台。基于理论与仿真分析,采用PCB制造工艺制造了图16(b)所示的新型传感器样机,动尺与定尺上的线圈参照图10、11设计,令感应线圈长度 $H=14$ mm,其余各

项参数参考表1,设计57个对极,测量范围为228 mm的传感器样机。图16(c)为传统传感器样机,其安装尺寸和新型传感器样机相同,二者可用同一实验平台展开实验。



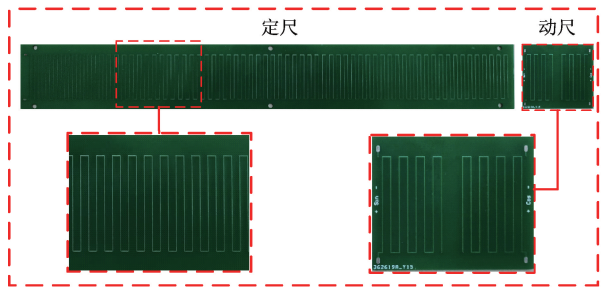
(a) 实验平台及传感器安装

(a) Experimental platform and sensor installation diagram



(b) 可抑制端部效应传感器样机

(b) Prototype sensor capable of suppressing end-effects



(c) 传统传感器样机

(c) Traditional sensor prototype

图16 实验平台及传感器样机

Fig. 16 Experimental platform and sensor prototype

图16(a)中,直线导轨、待测时栅及标定光栅尺LF185(精度 ± 2 μm)相互平行安装于精密大理石平台上。待测时栅动尺、光栅动尺经连接件与丝杠螺母刚性连接,电机驱动丝杠螺母转动,使时栅动尺与光栅动尺做同步直线运动。将光栅尺采集数据和直线时栅采集数据同步上传至上位机进行处理,时栅误差标定系统对比光栅尺信号与直线时栅信号,从而测得直线时栅误差数据。

4.2 对极内误差测试对比实验

分别对传统传感器样机和新型传感器样机展开对极内 ($W=4\text{ mm}$) 误差测试实验。使动尺相对定尺沿测量方向移动 4 mm , 每运动 0.1 mm 采集一次数据, 获得原始对极内误差曲线如图 17 所示。

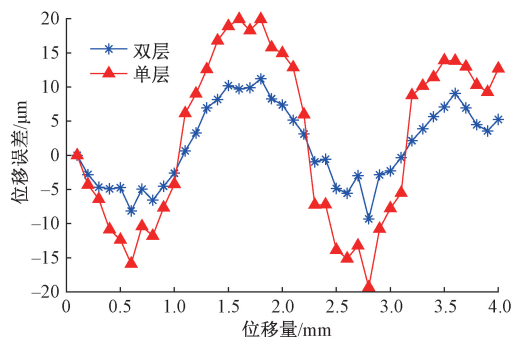


图 17 对极内误差对比

Fig. 17 Comparison of intrapolar errors

由图 17 可知, 周期内误差曲线与仿真周期内误差曲线趋势相似, 传统传感器和新型传感器在单对极内误差峰值均分别在 1.8 和 2.8 mm 处, 传统传感器对极内精度约为 $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$, 新型传感器对极内精度约为 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$, 这与仿真结果相符, 并实验层面验证了新型平面直线时栅位移传感器能够有效地抑制传感器的端部效应, 提高测量精度。

5 结 论

本文针对前期研制平面磁场式直线时栅位移传感器存在的端部效应致使匀速运动坐标系均匀度降低的问题, 提出一种抑制平面线圈端部效应的方法, 构建均匀性更高的交变磁场, 并研制了一种新型平面直线时栅位移传感器。首先, 建立了平面线圈的磁场激励模型, 分析了常见平面线圈端部效应及端部效应对均匀磁场的破坏程度, 提出了两种抑制端部效应的方案, 其中采用双层互补式激励线圈有较好的抑制效果; 其次, 基于端部效应抑制方案以及时栅测量原理, 设计了一种可抑制端部效应的新型直线时栅位移传感器, 分别从理论上和仿真上验证了可抑制端部效应的直线时栅位移传感器的可行性; 此外, 建立了对比仿真模型, 分析端部效应对传感器测量精度的影响; 最后, 采用 PCB 工艺制造了传感器样机并搭建精密实验平台对样机进行实验验证并展开精度测试对比实验, 实验结果显示, 新型平面直线时栅位移传感器能够有效地抑制传感器的端部效应, 提高测量精度, 传感器对极内原始测量精度从 $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$ 提高到 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ 。

本文提出的平面线圈端部效应抑制方案为平面磁场式时栅位移传感器构建更高均匀坐标系提供了一种新思

路。在未来研究中, 将针对设计的新型直线时栅位移传感器各参数进行进一步优化, 寻找各参数对传感器精度的影响, 进一步提高传感器测量精度。此外, 在实现精密一维测量的前提下, 进一步延展测量维度, 实现二维平面的精密测量。

参考文献

- [1] MISSOFFE A, CHASSAGNE L, TOPÇU S, et al. New simple optical sensor: From nanometer resolution to centimeter displacement range[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 176: 46-52.
- [2] GAO W, KIM S W, BOSSE H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(2): 773-796.
- [3] TREUTLER C P O. Magnetic sensors for automotive applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 91(1-2): 2-6.
- [4] 彭凯, 刘小康, 于治成, 等. 电极几何尺寸误差对纳米时栅位移传感器测量精度的影响及其抑制方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(7): 21-27.
PENG K, LIU X K, YU ZH CH, et al. The influence of the geometrical error of the electrode on the measurement accuracy of the nanometer time grating displacement sensor and its suppression method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(7): 21-27.
- [5] LIU X K, HUANG R, YU Z C, et al. A high-accuracy capacitive absolute time-grating linear displacement sensor based on a multi-stage composite method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(7): 8969-8978.
- [6] KUMAR A S A, ANANDAN N, GEORGE B, et al. Improved capacitive sensor for combined angular and linear displacement sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(22): 10253-10261.
- [7] LIU K C, YANG L, WANG M, et al. Optimization of high precision magnetostrictive linear displacement sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18535-18543.
- [8] WU L, TONG P, WANG X D, et al. An absolute linear displacement sensor based on orthogonal dual traveling wave magnetic field [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(6): 6019-6026.
- [9] 彭东林, 刘成康, 谭为民. 时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2000, 21(4): 340-342.
PENG D L, LIU CH K, TAN W M. Theory of space-time coordinate transformation and research on time-grid displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21(4): 340-342.
- [10] 孙世政, 周清松, 韩宇, 等. 不同安装模态对嵌入式时

- 栅测量误差的影响[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(10): 2290-2300.
- SUN SH ZH, ZHOU Q S, HAN Y, et al. Influence of different installation modes on measurement error of embedded time grating [J]. Optical and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2290-2300.
- [11] 杨继森, 牟智铭, 李路建, 等. 差动结构的平面二维时栅位移传感器[J]. 中国机械工程, 2020, 31(12): 1444-1451.
- YANG J S, MOU ZH M, LI L J, et al. Planar two-dimensional time grating displacement sensor with differential structure [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(12): 1444-1451.
- [12] 汤其富, 彭东林, 武亮, 等. 时栅角位移传感器中的多普勒效应影响及其抑制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 620-626.
- TANG Q F, PENG D L, WU L, et al. Research on Doppler effect and its suppression method in time grating angular displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 620-626.
- [13] KIM K C. Analysis on the characteristics of variable reluctance resolver considering uneven magnetic fields[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7): 3858-3861.
- [14] HWANG S H, KWON Y H, KIM J M, et al. Compensation of position error due to amplitude imbalance in resolver signals [J]. Journal of Power Electronics, 2009, 9(5): 748-756.
- [15] 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): 83-90.
- WU L, PENG D L, LU J, et al. Linear time grating displacement sensor based on planar coil linear array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 83-90.
- [16] KANG G, NAM K. Field-oriented control scheme for linear induction motor with the end effect [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2005, 152(6): 1565-1572.
- [17] ZHU Y, LEE S G, CHUNG K S, et al. Investigation of auxiliary poles design criteria on reduction of end effect of detent force for PMLSM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2863-2866.
- [18] HUA W, CHENG M. Static characteristics of doubly-salient brushless machines having magnets in the stator considering end-effect [J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36(7): 754-770.
- [19] 采军, 王淑红, 庞聪. 一种考虑横向端部效应影响的直线感应电机电磁设计方法[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(5): 1114-1121.
- CAI J, WANG SH H, PANG C. An electromagnetic design method for linear induction motors considering the influence of lateral end effect [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(5): 1114-1121.

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 Institute of Automotive Industry in 2001, M. Sc. degree and Ph. D. degree 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.



卢渝, 2020 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: luyu@2020.cqut.edu.cn

Lu Yu received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensors.