

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514044

# 三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器\*

杨继森<sup>1</sup>, 罗云沛<sup>1</sup>, 曹峻杰<sup>1</sup>, 易靖松<sup>1</sup>, 张静<sup>2</sup>

(1. 重庆理工大学机械工程学院 重庆 400054; 2. 重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

**摘要:**针对当前研制的磁场式时栅角位移传感器磁场感应线圈在不同间隙耦合到的磁场性质不同,导致传感器对时变磁场有效面积利用率低、磁场拾取能力弱、感应信号幅值小等问题,影响传感器对极内的残余误差成分与大小,故提出了一种三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器。搭建数学模型分析传感器激励气隙磁场空间分布特性,提出气隙磁场分层耦合理论,以此将气隙磁场分为3种类型。建立三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器测量模型,激励线圈采用双层互补式结构,使线圈两端对磁场的约束能力相互补偿让磁场分布更均匀;感应线圈采用三层互补形状线圈组合结构,不同形状线圈耦合对应类型气隙磁场,使传感器信号幅值与稳定性大幅提高。分析平面感应线圈磁场耦合原理及传感器信号处理方法,向激励线圈通入两路激励信号,由感应线圈得到测量行波信号并通过鉴相的方式解算出角位移量。通过电磁仿真对传感器进行误差分析与结构参数优化,采用PCB工艺制作传感器样机进行实验验证。仿真与实验结果表明:相较于采用传统单层耦合结构,传感器测量精度提高了12.6%,空间气隙磁场引入的谐波误差减小,感应信号幅值与稳定性提高,提升了信噪比,传感器最佳安装间隙为0.6 mm,传感器测量精度为 $\pm 83''$ 。

**关键词:**角位移传感器;时栅;气隙磁场分层耦合原理;三层互补形状线圈组合结构

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

## A time-grating angular displacement sensor with a three-layer complementary shape coil combination structure

Yang Jisen<sup>1</sup>, Luo Yunpei<sup>1</sup>, Cao Junjie<sup>1</sup>, Yi Jingsong<sup>1</sup>, Zhang Jing<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** To address the issue that the induction coil of existing magnetic-field-based time-grating angular displacement sensors couples with different magnetic-field characteristics at different air-gap heights, resulting in low utilization of the effective time-varying magnetic-field area, weak magnetic-field pickup capability, small induced-signal amplitude, and consequently increased residual errors within a pole pitch, this study proposes a time-grating angular displacement sensor featuring a three-layer complementary coil-shape assembly. A mathematical model is established to analyze the spatial distribution of the excitation magnetic field in the air gap. Based on this, a stratified coupling theory is developed, enabling the air-gap magnetic field to be categorized into three types. Based on this theory, a measurement model of the proposed sensor is constructed. The excitation coil adopts a double-layer complementary winding structure that enables mutual compensation of magnetic-field constraints at the ends of the winding, resulting in a more uniform excitation field. The induction unit employs a three-layer complementary coil-shape assembly, in which coils of different geometries are placed at different air-gap heights to couple with their corresponding air-gap magnetic-field types. This design significantly improves the amplitude and stability of the induced signal. The principle of magnetic field coupling of planar induction coils and the sensor signal processing method are analyzed: two channels of excitation signals are applied to the excitation coil, the measured traveling wave signal is obtained from the induction coil, and the angular displacement is calculated through phase discrimination. The error analysis and structural parameter

收稿日期:2025-05-16 Received Date: 2025-05-16

\* 基金项目:国家自然科学基金项目(52175454)、重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0382)、重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K202301106)、重庆理工大学研究生创新项目(gzlcx20252013)资助

optimization of the sensor are carried out through electromagnetic simulation, and the sensor prototype was made by PCB process for experimental verification. The simulation and experimental results show that compared with the traditional single-layer coupling structure, the measurement accuracy of the sensor is improved by 12.6%, the harmonic error introduced by the space air gap magnetic field is reduced, the amplitude and stability of the induced signal are improved, and the signal-to-noise ratio is improved. The optimal installation gap of the sensor is 0.6 mm, and the measurement accuracy of the sensor is  $\pm 83''$ .

**Keywords:** angular displacement sensor; time-grating; stratified coupling principle of the air-gap magnetic field; three-layer complementary coil-shape assembly

## 0 引 言

制造业是我国实现经济“创新驱动、转型升级”的主要战场<sup>[1]</sup>。随着科学技术发展,我国提出“中国制造2025”发展战略,其中精密仪器是实现从制造大国向制造强国转变的重要基础,而精密位移测量技术是精密仪器领域的核心技术<sup>[2-6]</sup>。其中精密角位移测量技术被广泛应用于半导体、数控机床、计量检测、芯片制造、航空航天、国防军工等高端制造领域,精密角位移测量装置作为核心零部件在其中发挥着重要作用<sup>[7-10]</sup>。

由于磁场温度稳定性强,以及对油污、灰尘、水雾等非导电污染物不敏感,因此常被用作精密位移测量传感器的媒介,电磁感应式位移传感器因其高稳定性、高可靠性、强抗干扰能力以及强环境适应能力等优势被广泛使用,如旋转变压器、感应同步器等<sup>[11-14]</sup>。而磁场式时栅位移传感器作为一种国内自主研发的新型电磁感应式位移传感器,基于“时空转换理论”,以时间测量空间,具有抗干扰能力强、精度高、成本低等优点<sup>[15-19]</sup>。其中,磁场式时栅角位移传感器由传统电机演变而来,通过检测磁场变化间接测量角位移,将匀速运动的磁场作为实现时空坐标转换理论的载体<sup>[20]</sup>。磁场式时栅角位移传感器的磁场耦合机理以交变磁场的空间调制为核心,通过结构优化和信号处理技术提高传感器信噪比,实现高精度测量。

针对磁场式时栅位移传感器的结构优化,诸多学者进行了深入研究,采用优化绕组布线的方式,陈鸿友等<sup>[21]</sup>提出一种多圈结构的多个物理场共同耦合作用的角位移传感器;桂强<sup>[22]</sup>提出激励线圈与感应线圈均为差动式结构的双层互补型绝对式时栅角位移传感器,进一步抑制误差;陈自然等<sup>[23]</sup>通过排布离散激励绕组与控制感应绕组形状感应位移信号的变化规律,设计出一种基于离散绕组的磁场式时栅位移传感器;杨继森等<sup>[24]</sup>通过建立平面线圈磁场分布的数理模型,提出感应线圈的不同形状与适配的气隙磁场耦合的不同高度存在一定的对应关系,使用基于气隙磁场分层耦合的方式来提高传感器信噪比。

针对磁场式时栅位移传感器的信号处理及误差分析,范兵等<sup>[25]</sup>研究了磁场式位移传感器误差的数理模型,同时提出了一种提取动态误差的方法;彭凯等<sup>[26]</sup>通

过运用分段面积积分方法分析了电极几何尺寸误差对传感器测量精度的影响,并验证了多个感应电极平均效应的有效性;杨继森等<sup>[27]</sup>提出了一种磁场补偿驱动方案,该方案通过对双层平面线圈分层分幅值激励来提高时变磁场的对称性。

总体来讲,磁场式时栅角位移传感器磁场信号强度的提升与误差补偿可通过提高激励信号频率、优化绕组布线、增加绕线匝数等典型优化方法来实现。但是提高激励信号频率的同时也会让耦合信号频率变高、损耗增加,从而影响传感器分辨力,且对传感器硬件性能要求更高;以印刷电路板(printed circuit board, PCB)工艺代替传统的磁导材料开槽方式所研制的磁场式时栅角位移传感器,能提高生产率与性能,降低成本,符合当前研究需求。其中通过优化绕组布线的方式虽能提升磁场利用率、适配结构约束,但设计复杂度提高,工艺要求严格,增加了工程成本;而简单地增加平面线圈绕线匝数,虽结构简单、成本较低,但同样受制于平面线圈加工工艺,激励线圈与感应线圈之间的传感器空间磁场耦合间隙会发生改变,从而影响传感器对极内残余误差成分与大小,导致传感器精度降低。

针对以上问题,本研究提出了三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器,旨在既能满足加工工艺限制,又能在不过度提高激励信号频率与绕线匝数的前提下提高传感器测量精度。分析磁场耦合机理,探寻针对不同气隙磁场下的线圈最佳耦合形状结构与组合,寻找影响传感器测量精度的规律与作用机制,对仿真与实验数据进行误差分析,减小磁场气隙耦合误差,提高传感器感应信号强度与稳定性。

## 1 传感器结构及位移测量原理

### 1.1 传感器激励气隙磁场数学模型

磁场由运动的电荷产生,而电磁感应效应指磁场发生变化时,导体回路中产生相应感应电流的现象。磁场式时栅角位移传感器的工作原理基于电磁感应效应,该传感器先利用激励线圈构建激励磁场,再通过感应线圈拾取磁场信号,将其转化为带有位置信息的电信号,经过信号处理与解析后得到所需角位移量。

交变磁场的构建通常通过在具有一定宽度的导线内通入交变电流来实现,但在实际应用中,交变磁场的磁场分布受到线圈结构、材料特性、外部环境等因素的影响,与理想情况存在差异,因此需要建立气隙磁场分布数学模型来进行理论分析并溯源误差。以一根通电电流为  $I$  的长直导线为例,对其产生的磁场进行分析如图 1 所示。

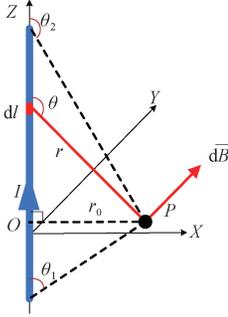


图 1 通电长直导线磁场示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the magnetic field of an energized long straight wire

设通电长直导线与  $Z$  轴重合,点  $P$  为平面  $XOZ$  内任意一点,点  $P$  到载流直导线的垂直距离为  $r_0$ ,点  $P$  到导线两端的角度分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ,根据毕奥-萨伐尔定律,电流元在点  $P$  产生的磁场强度为:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I dl \sin \theta}{4\pi r^2} \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  表示真空磁导率;  $\vec{dB}$  方向沿  $Y$  轴正方向,所以通电长直导线在点  $P$  产生的磁场强度  $B$  为:

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (2)$$

同理在三维空间中,磁场式时栅角位移传感器通过将导线以特定方式绕制来构建所需激励磁场,图 2 为传感器通电激励导线磁场示意图,直观反映了空间磁场特性。

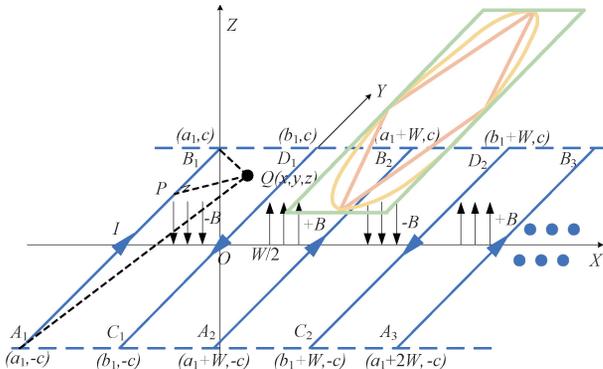


图 2 通电激励导线磁场示意图

Fig. 2 Diagram of the magnetic field of an energized excitation wire

向导线通入激励电流  $I$ ,则通电导线将在周围产生激励磁场,设通电导线  $A_1B_1$  在三维空间中任意一点  $Q(x, y, z)$  产生的磁场强度为  $B_{A_1B_1}$ 。

$$\begin{cases} B_{A_1B_1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi |PQ|} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \\ |PQ| = \sqrt{(x - a_1)^2 + z^2} \\ \cos \theta_1 = \frac{y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y + c)^2 + z^2}} \\ \cos \theta_2 = \frac{-(c - y)}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (c - y)^2 + z^2}} \end{cases} \quad (3)$$

为了减小角位移传感器整周误差,需保证传感器激励线圈与感应线圈平行放置,传感器感应线圈所拾取的有效磁场信号为激励线圈产生的激励磁场沿  $Z$  轴方向的磁场强度分量,所以通电导线  $A_1B_1$  在三维空间点  $Q(x, y, z)$  产生的激励磁场沿  $Z$  轴方向的磁场强度分量可以用  $B_{A_1B_1Z}$  表示。

$$\begin{aligned} B_{A_1B_1Z} &= B_{A_1B_1} \cos \gamma = B_{A_1B_1} \frac{a_1 - x}{\sqrt{(a_1 - x)^2 + z^2}} = \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi |PQ|} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \frac{a_1 - x}{\sqrt{(a_1 - x)^2 + z^2}} = \\ &= \frac{\mu_0 I (a_1 - x)}{4\pi [(a_1 - x)^2 + z^2]} \left[ \frac{y + c}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y + c)^2 + z^2}} - \right. \\ &\quad \left. \frac{-(c - y)}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (c - y)^2 + z^2}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

同理,通电导线  $C_1D_1$  在三维空间点  $Q(x, y, z)$  产生的激励磁场沿  $Z$  轴方向的磁场强度分量可以用  $B_{C_1D_1Z}$  表示。

$$\begin{aligned} B_{C_1D_1Z} &= B_{C_1D_1} \cos \gamma = B_{C_1D_1} \frac{x - b_1}{\sqrt{(x - b_1)^2 + z^2}} = \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi |PQ|} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \frac{x - b_1}{\sqrt{(x - b_1)^2 + z^2}} = \\ &= \frac{\mu_0 I (x - b_1)}{4\pi [(x - b_1)^2 + z^2]} \left[ \frac{y + c}{\sqrt{(b_1 - x)^2 + (y + c)^2 + z^2}} - \right. \\ &\quad \left. \frac{-(c - y)}{\sqrt{(b_1 - x)^2 + (c - y)^2 + z^2}} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

由此,在三维空间点  $Q(x, y, z)$  产生的最终有效磁场强度  $B_z$  是由所有激励通电导线在此点产生的沿  $z$  轴方向的激励磁场强度分量相叠加而得到。

$$B_z = \sum_{i=1}^n B_{A_iB_iZ} + \sum_{j=1}^n B_{C_jD_jZ} \quad (6)$$

基于式(6),建立传感器激励通电导线磁场数学模型并进行数值仿真分析,模拟参数设置如表 1 所示。

表1 传感器激励通电导线模拟参数

Table 1 Analog parameters of energized wire excited by sensor

参数名	数值
真空磁导率 $\mu_0 / (\text{N} \cdot \text{A}^{-2})$	$4\pi \times 10^{-7}$
电流 $I / \text{A}$	0.1
传感器节距 $W / \text{mm}$	4
节距数/个	3

设置耦合间隙高度为 0.5 mm, 图 3 为传感器激励单元的三维气隙磁场分布示意图, 直观呈现了磁场空间形态; 再对传感器激励单元在不同耦合间隙高度下进行仿真, 其产生的气隙磁场在  $XOZ$  平面沿着  $X$  轴方向的磁场强度分布曲线对比如图 4 所示, 清晰地表示了耦合间隙高度的变化对磁场分布的影响规律。

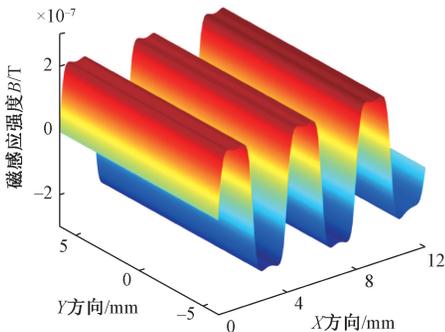


图3 气隙磁场三维视图

Fig. 3 3D view of the air gap magnetic field

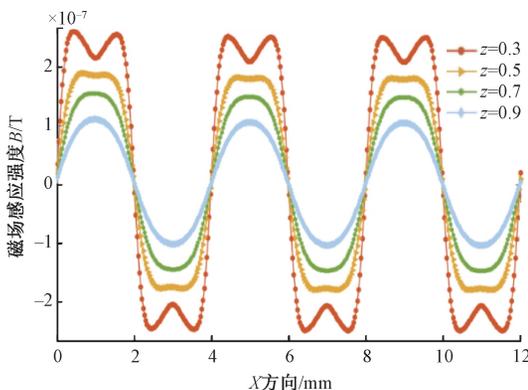


图4 不同耦合间隙气隙磁场分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of air gap magnetic field distribution at different coupling gaps

由图 4 可看出, 随着耦合间隙高度变化, 传感器激励单元产生的气隙磁场呈现明显的分布特征差异, 以此将不同耦合间隙的气隙磁场进行分类: 在  $z = 0.3 \text{ mm}$

左右高度的气隙磁场在周期内表现出显著的波动特性, 其频谱中含有大量高次谐波成分, 将其设为 A 类气隙磁场; 在  $z = 0.5 \text{ mm}$  左右高度的气隙磁场近似分布均匀, 将其设为 B 类气隙磁场; 在  $z = 0.7 \text{ mm}$  以上高度的气隙磁场大致呈正弦规律变化, 为成分相对单一的基波磁场, 将其设为 C 类气隙磁场。由此, 可以根据传感器激励磁场特性设计三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器。

## 1.2 传感器气隙磁场分层耦合理论

当在传感器激励单元中施加激励电流  $I$  时, 基于法拉第电磁感应原理, 感应单元中耦合产生的感应电动势  $\varepsilon$  可由式 (7) 来描述, 即:

$$\varepsilon = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt} = -N_2 \frac{d(N_1 I \Lambda(x))}{dt} = -N_1 N_2 \Lambda(x) \frac{dI}{dt} = -M \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

其中,  $\Phi_B$  为穿过感应线圈的磁通量,  $N_1$  为激励线圈匝数,  $N_2$  为感应线圈匝数,  $\Lambda(x)$  为气隙磁导,  $M$  为互感系数。

传感器感应信号正弦性越好, 传感器测量精度越高, 由式 (7) 可知, 感应信号的正弦性取决于气隙磁导  $\Lambda(x)$ , 而后的正弦性又由感应线圈形状与激励磁场的契合程度决定。同时, 感应信号幅值不仅与线圈匝数  $N_2$  成正比, 还受耦合间隙高度  $z$  的影响。

传感器感应信号波形质量很大程度取决于激励磁场分布特性与感应线圈几何形状的契合程度。在理想条件下, 传感器感应信号的正弦性优化存在两种最佳匹配模式: 第 1 种是当激励单元产生完全均匀的气隙磁场时, 采用正弦形感应线圈其耦合信号正弦性最佳; 第 2 种是当激励单元产生的气隙磁场为纯基波分布时, 采用矩形感应线圈其耦合信号正弦性最佳。但结合图 4 可知, 在实际应用中所构建的气隙磁场一般由较为抖动的 A 类气隙磁场、近似分布均匀的 B 类气隙磁场和近似基波的 C 类气隙磁场组合而成, 这时若只采用单一的正弦形感应线圈或矩形感应线圈对磁场进行耦合, 当通过在不同间隙增加感应线圈的匝数来提高感应信号强度时, 则可能会改变感应线圈的耦合间隙从而耦合到其他类型的气隙磁场, 从而引入谐波误差, 影响感应信号正弦性以及传感器测量精度。

由此, 传感器基于气隙磁场分层耦合理论, 感应线圈采用三层互补形状线圈组合结构, 根据气隙磁场的空间分布特点, 通过在不同间隙高度  $z$  使用不同形状的平面线圈来对气隙磁场进行耦合, 使不同间隙高度的感应线圈都能耦合到最契合的气隙磁场, 且不同形状的线圈之间具有互补特性, 显著提高了传感器感应信号的幅值和信噪比, 同时提高了传感器的稳定性。

图5为传感器气隙磁场分类与线圈形状匹配示意图,对于近似分布均匀的B类气隙磁场,在更靠近A类气隙磁场的高度,为了耦合激励导线结构形状中心的更稳定的磁场可以采用菱形平面感应线圈;在更靠近C类气隙磁场的高度,为了更好地耦合均匀磁场可以采用正弦形平面感应线圈。对于近似基波的C类气隙磁场则采用矩形平面感应线圈来耦合。

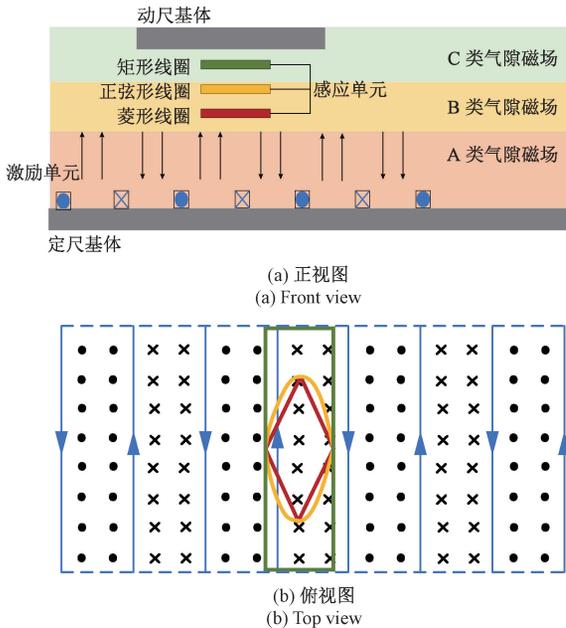


图5 气隙磁场分类与线圈形状匹配示意图

Fig. 5 Diagram of air-gap magnetic field classification and coil shape matching

### 1.3 传感器测量模型及信号感应原理

三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器示意图如图6所示。传感器结构分为作为激励单元的定尺和作为感应单元的动尺,激励线圈采用双层互补式结构,感应线圈采用三层互补形状线圈组合结构。

图6(a)为传感器隐藏动尺基体后的俯视图,图6(b)为传感器激励线圈和感应线圈组合后的结构。图6(c)为传感器正视图的截取部分,由下至上为定尺基体、激励线圈、磁场间隙、三层感应线圈和动尺基体,往激励线圈通入激励信号后产生气隙磁场,将三层互补形状感应线圈固定在不同的耦合间隙高度 $z$ 并产生感应信号。图6(d)为感应线圈模型,采用三层互补形状线圈组合结构,三层感应线圈的节距都为 $W$ ,不同形状的线圈固定在不同间隙高度 $z$ ,耦合最契合的磁场类型,第1层为菱形平面感应线圈,第2层为正弦形平面感应线圈,二者都耦合B类气隙磁场,第3层为矩形平面感应线圈,耦合C类气隙磁场。三层平面线圈相互平行并正对激励线

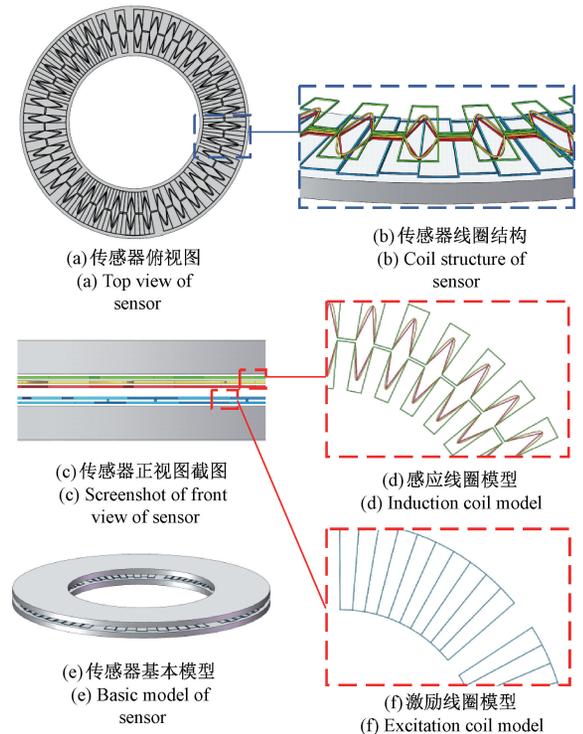


图6 三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the time-grating angular displacement sensor with a three-layer complementary coil-shape assembly

圈,通过过孔串联在一起,使每层感应线圈的感应电压叠加在一起,就是传感器总的输出电压信号,相较于单层线圈耦合,信号强度与信号稳定性都有了大幅提升。图6(f)为激励线圈的模型,由节距为 $W$ 的矩形线圈交替绕制而成,共6个扇区,相邻扇区之间相差 $3/4$ 个节距以实现空间上正交,相邻扇区的激励线圈分别通入相位差为 $\pi/2$ 的两路激励信号以实现信号在时间上正交。旧式的双层时栅角位移传感器激励线圈仅采用上层通余弦信号、下层通正弦信号的方式环绕定尺一周,存在两路激励线圈到感应线圈的距离不同从而导致同一感应线圈拾取到的正余弦信号产生的磁场强度不同。分扇区的双层互补式矩形线圈结构能有效避免这一不足,这种互补结构可以使在同一半径上线圈两端对磁场的约束能力相互补偿,让磁场分布更均匀,使得双层的激励线圈之间的间隙对耦合间隙 $z$ 的影响可以忽略不计,双层激励线圈顶层到感应线圈的距离可以近似为感应信号的耦合间隙 $z$ 。图6(e)为传感器的基本模型。

### 1.4 平面感应线圈磁场耦合原理及传感器信号处理

在激励线圈的6个扇区中通入两路激励信号,设在第1、3、5扇区通入幅值为 $A$ 、频率为 $\omega$ 的电流

$I_a = A \sin(\omega t)$ , 在第 2、4、6 扇区通入相位差为  $\pi/2$  的电流  $I_b = A \cos(\omega t)$ 。

以菱形感应线圈在第 1 扇区的激励气隙磁场中的磁通量变化情况为例, 其所在的 B 类气隙磁场  $B_{rho}(\theta, 0)$  在一个周期  $W$  内的表达式简化后可表示为:

$$B_{rho}(\theta, 0) = \begin{cases} k_{m1} \sin(\omega t), & \theta \in [0, W/2] \\ -k_{m1} \sin(\omega t), & \theta \in [W/2, W] \end{cases} \quad (8)$$

由图 7 可知, 当菱形平面感应线圈的角位移量  $\theta$  近似为沿  $X$  轴正方向移动  $\theta$  时, 半个周期的菱形线圈内既有正磁场穿过又有负磁场穿过, 负磁场穿过的面积抵消了一部分正磁场穿过的面积, 此时半个周期的菱形线圈内耦合到的经过正负磁场抵消后的磁场穿过面积  $S_{rho}$  正好呈余弦函数分布。正弦形线圈与矩形线圈的磁场穿过面积  $S_{sin}$  与  $S_{rec}$  同理, 皆呈余弦函数分布。

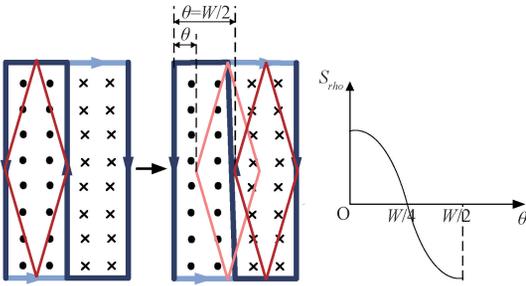


图 7 半周期菱形感应线圈内部磁通示意图

Fig. 7 Diagram of the internal magnetic flux of a half-cycle rhombic induction coil

所以菱形平面感应线圈在第 1、3、5 扇区拾取到的磁通  $\Phi_{rho1}(t, \theta)$  可以表示为:

$$\Phi_{rho1}(t, \theta) = k_{rho1} \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{W}\theta\right) \quad (9)$$

因为实现了在空间和时间上的正交, 所以菱形平面感应线圈在第 2、4、6 扇区拾取到的磁通  $\Phi_{rho2}(t, \theta)$  可以表示为:

$$\Phi_{rho2}(t, \theta) = k_{rho2} \cos(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{W}\theta\right) \quad (10)$$

此时, 因菱形平面感应线圈拾取到的磁通  $\Phi_{rho1}(t, \theta)$  与磁通  $\Phi_{rho2}(t, \theta)$  的变化而产生了感应电动势  $E_{rho1}(t, \theta)$  与电动势  $E_{rho2}(t, \theta)$ , 则菱形平面感应线圈的输出信号  $E_{rho}(t, \theta)$  可以表示为:

$$\begin{cases} E_{rho1}(t, \theta) = \frac{d\Phi_{rho1}(t, \theta)}{dt} = k_{rho1} \cos(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{W}\theta\right) \\ E_{rho2}(t, \theta) = \frac{d\Phi_{rho2}(t, \theta)}{dt} = -k_{rho2} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{W}\theta\right) \\ E_{rho}(t, \theta) = E_{rho1}(t, \theta) + E_{rho2}(t, \theta) = k_{rho} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}\theta\right) \end{cases} \quad (11)$$

同理, 正弦形平面线圈耦合 B 类气隙磁场  $B_{sin}(\theta, 0)$  后的输出信号  $E_{sin}(t, \theta)$  可以表示为:

$$\begin{cases} E_{sin1}(t, \theta) = \frac{d\Phi_{sin1}(t, \theta)}{dt} = k_{sin1} \cos(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{W}\theta\right) \\ E_{sin2}(t, \theta) = \frac{d\Phi_{sin2}(t, \theta)}{dt} = -k_{sin2} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{W}\theta\right) \\ E_{sin}(t, \theta) = E_{sin1}(t, \theta) + E_{sin2}(t, \theta) = k_{sin} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}\theta\right) \end{cases} \quad (12)$$

同理, 矩形平面线圈耦合 C 类气隙磁场  $B_{rec}(\theta, 0)$  后输出的行波信号  $E_{rec}(t, \theta)$  可以表示为:

$$\begin{cases} E_{rec1}(t, \theta) = \frac{d\Phi_{rec1}(t, \theta)}{dt} = k_{rec1} \cos(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{W}\theta\right) \\ E_{rec2}(t, \theta) = \frac{d\Phi_{rec2}(t, \theta)}{dt} = -k_{rec2} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{W}\theta\right) \\ E_{rec}(t, \theta) = E_{rec1}(t, \theta) + E_{rec2}(t, \theta) = k_{rec} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}\theta\right) \end{cases} \quad (13)$$

传感器的三层平面感应线圈通过过孔串联, 所以传感器最终输出的行波信号为菱形平面感应线圈输出信号  $E_{rho}(t, \theta)$ 、正弦形平面感应线圈输出信号  $E_{sin}(t, \theta)$  和矩形平面感应线圈输出信号  $E_{rec}(t, \theta)$  三者相加, 提高了传感器感应信号的稳定性与幅值, 可以表示为:

$$E = E_{rho}(t, \theta) + E_{sin}(t, \theta) + E_{rec}(t, \theta) = k \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{W}\theta\right), \quad k = k_{rho} + k_{sin} + k_{rec} \quad (14)$$

由式(14)可知,  $k$  为常数,  $\theta$  为传感器角位移信息, 在  $E$  的相位中体现, 因此测量行波信号并解析与参考信号的相位差就能实现对角位移量的解算, 其原理示意图如图 8 所示。

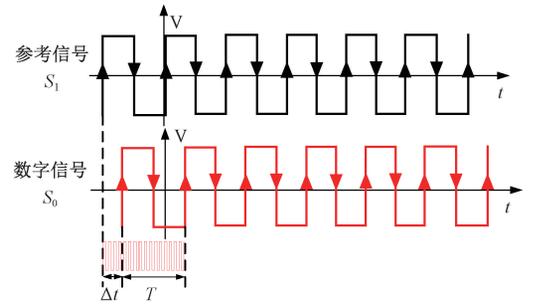


图 8 传感器位移解算示意图

Fig. 8 Diagram of the displacement calculation of the sensor

将传感器总的行波信号进行低通、滤波、放大、整形处理得到带有位置信息的方波数字信号  $S_0$ , 将  $S_0$  与一组跟该信号同频且只以时间为变量的参考信号  $S_1$  比较。采用高频时钟插补的技术测得  $S_0$  与  $S_1$  的方波信号周期  $T$

以及时间差  $\Delta t$ , 从而实现角位移量  $\theta$  的解算, 解算关系式可表示为:

$$\theta = (N + \Delta t/T) \cdot \theta_0 \quad (15)$$

其中,  $N$  为移动的节距数,  $\theta_0$  为周期  $T$  对应的位移量。传感器位移测量原理如图 9 所示。

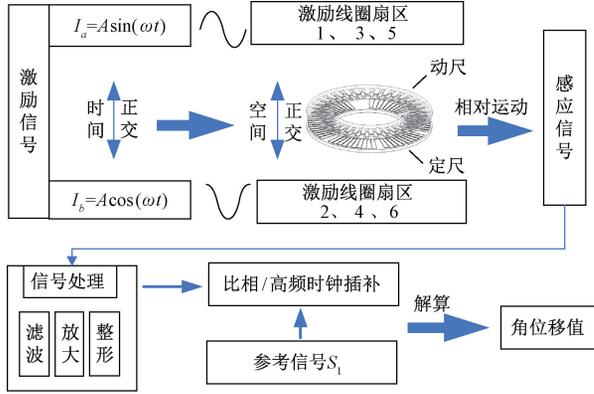


图 9 传感器位移测量原理

Fig. 9 Principle of sensor's displacement measurement

## 2 传感器电磁仿真与误差分析

### 2.1 传感器单层感应仿真信号与总信号比较分析

使用仿真软件 Maxwell 对传感器结构模型进行有限元仿真。理想状态下增大感应线圈的电阻值可以减小感应电动势产生的电流, 从而减弱对仿真模型的电磁干扰。仿真基本参数如表 2 所示, 给激励线圈 1、3、5 扇区通入幅值为 0.1 A、频率为 500 kHz 的正弦交变电流, 第 2、4、6 扇区通入相等幅值频率的余弦交变电流。使传感器动尺相对于定尺沿顺时针方向运动一个节距 ( $10^\circ$ ) 的角位移, 运动步距设置为  $0.2^\circ$ 。为了更加直观地观察仿真信号, 激励线圈与感应线圈匝数皆设置为 1 匝, 使其与后续实验样机实际情况保持一致。

根据气隙磁场分层耦合原理, 每层感应线圈由两路激励信号所产生的两路驻波相加就能合成单层平面感应线圈的输出行波信号, 将三层平面感应线圈的输出行波信号相加就能合成传感器总的输出行波信号, 以气隙间隙为 0.6 mm 的传感器电磁仿真为例, 其输出的行波信号如图 10 所示。在仿真信号曲线图中, 为了便于观察, 设置横轴为时间  $0.2 \mu\text{s}/\text{div}$ , 设置单层平面感应线圈的输出行波信号纵轴为  $20 \text{ mV}/\text{div}$ , 设置三层平面感应线圈的输出行波信号纵轴为  $50 \text{ mV}/\text{div}$ 。

从图 10 可以看出, 在气隙间隙为 0.6 mm 时, 传感器菱形平面线圈的输出信号  $E_{rho}$  幅值约为 30 mV, 正弦形平面线圈的输出信号  $E_{sin}$  幅值约为 33 mV, 矩形平面线

表 2 传感器仿真参数设置

Table 2 Sensor simulation parameter settings

参数名	设定值
激励电流幅值/A	0.1
激励电流频率/kHz	500
感应线圈阻抗/ $\Omega$	1
气隙间隙/mm	0.5、0.6、0.7
定子、转子基体外径/mm	70
定子、转子基体内径/mm	40
激励线圈、感应线圈线宽/mm	0.1
激励线圈匝数/匝	1
感应线圈匝数/匝	1
动尺、定尺基体厚度/mm	3
基体材料	Steel_1008
线圈材料	Copper
传感器节距/ $^\circ$	10
仿真时长/ns	2 000
时间步长/ns	40
网格划分	Auto
边界条件/%	100

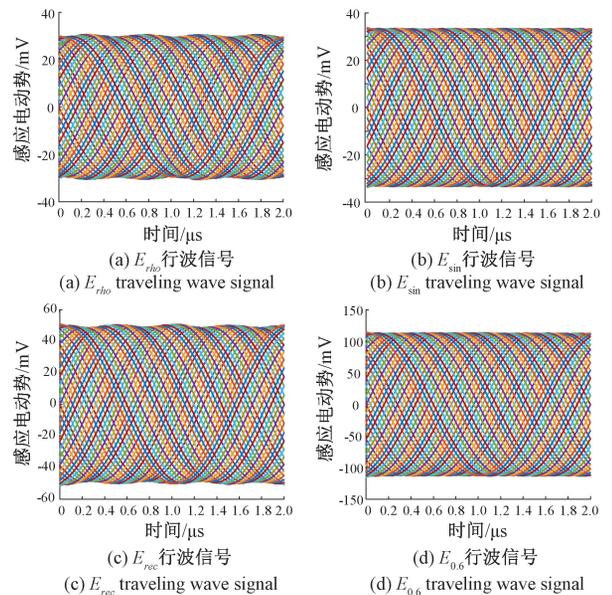


图 10 仿真行波信号曲线图

Fig. 10 Simulation traveling wave signal curves

圈的输出信号  $E_{rec}$  幅值约为 52 mV, 传感器电磁仿真总的输出信号  $E_{0.6}$  幅值约为 115 mV。由此可知, 传感器采用三层互补形状线圈组合结构的方式相比于采用气隙磁场单层耦合的方式, 感应信号的幅值提高了 121.1%。另

外,菱形平面线圈输出的行波信号曲线边缘与矩形平面线圈输出的行波信号曲线边缘皆有一定波动,但正好互补,使得合成后的行波信号曲线边缘趋于平整,提高了传感器感应信号的稳定性,基本符合前文理论部分的结论。

使传感器动尺相对于定尺沿顺时针方向运动一个节距( $10^\circ$ )的角位移,期间均匀设置 50 个位置采集点。利用 MATLAB 得到传感器仿真误差曲线,再对其进行 FFT 快速傅里叶变换提取误差谐波成分就可以得到传感器误差频谱图。将单层正弦形平面感应线圈的误差曲线与误差频谱图与三层总的合成信号进行比较分析如图 11 所示。

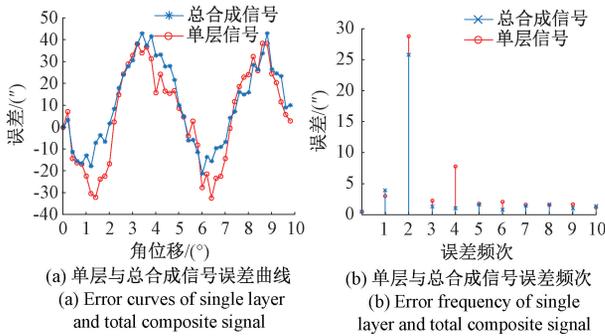


图 11 传感器仿真误差分析

Fig. 11 Simulation error analysis of sensor

从图 11(a) 可以看出,在气隙间隙为 0.6 mm 时,单层正弦形平面感应线圈的输出信号  $E_{\text{sin}}$  的误差曲线表示范围为  $(-32.35'', 38.46'')$ ,峰峰值为  $70.81''$ ;3 层总的合成信号  $E$  的误差曲线表示范围为  $(-21.35'', 42.69'')$ ,峰峰值为  $64.04''$ 。相比于单层耦合的方式,采用三层互补形状线圈组合结构的感应信号误差有所下降,更具优势。根据图 11(b) 对两者误差里的误差成分进行分析,单层正弦形平面感应线圈的输出信号  $E_{\text{sin}}$  的误差主要成分为二次、四次误差;三层总的合成信号  $E$  的误差主要成分为二次误差,且相较于单层输出信号,其二次误差有所下降。由此可得,采用三层互补形状线圈组合结构的输出信号相较于单层信号强度更高、稳定性更强,和前文理论部分的结论基本一致。

### 2.2 不同气隙间隙下传感器感应仿真信号比较分析

为了进一步探求传感器的最佳气隙间隙,现再对气隙间隙为 0.5 和 0.7 mm 的传感器进行电磁仿真,所得各自总的输出信号波形图如图 12 所示。

从图 12 可以看出,当气隙间隙为 0.5 mm 时,传感器电磁仿真总输出信号  $E_{0.5}$  幅值约为 125 mV;当气隙间隙为 0.7 mm 时,传感器电磁仿真总输出信号  $E_{0.7}$  幅值约为 105 mV;再结合图 10(d) 可以看出,随着气隙间隙的增大,传感器的输出信号幅值逐渐变小。

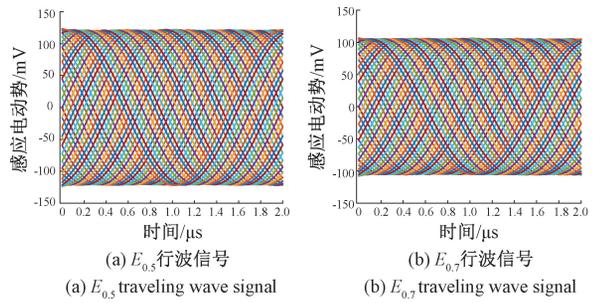


图 12 传感器不同气隙间隙仿真行波信号曲线

Fig. 12 Simulation traveling wave signal curves of the sensors at different air-gap heights

将传感器不同气隙间隙的电磁仿真误差曲线与误差频谱图进行比较分析如图 13 所示,具体数据总结如表 3 所示。

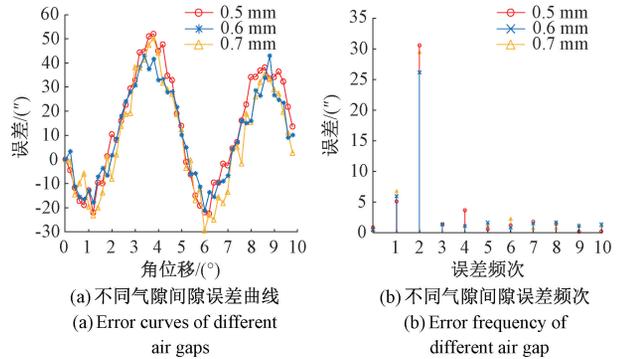


图 13 传感器不同气隙间隙仿真误差分析

Fig. 13 Simulation error analysis of the sensor at different air-gap heights

表 3 传感器不同气隙间隙仿真误差数据总结

Table 3 Summary of simulation error data of sensor with different air gaps

气隙间隙/mm	误差曲线范围	误差峰峰值/( $''$ )	二次误差值/( $''$ )
0.5	$[-22.5'', 52.12'']$	74.62	31.05
0.6	$[-21.35'', 42.69'']$	64.04	26.59
0.7	$[-29.6'', 50.26'']$	79.86	29.42

结合图 13 和表 3 可以看出,通过调整传感器激励线圈与感应线圈的气隙间隙,发现在气隙间隙为 0.6 mm 时,误差峰峰值相对最小;不同气隙间隙的误差主要成分皆为二次误差且气隙间隙为 0.6 mm 时最小。

综上所述通过对三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器模型进行电磁仿真,得出相较于采用单层平面线圈结构,该传感器的感应信号正弦性、信号强度、稳定性等都有所优化,符合前文理论部分。在气隙间隙为 0.6 mm 时传感器输出信号最优,证实了前文提出的用

菱形与正弦形平面感应线圈耦合 B 类气隙磁场,用矩形平面感应线圈耦合 C 类气隙磁场传感器输出信号效果最优的理论。

### 3 实验验证与分析

#### 3.1 实验平台搭建

设计实验方案对传感器进行测试,采用 PCB 工艺制作传感器样机。传感器样机分为定尺与动尺两部分,样机厚度都为 1.6 mm,传感器内径和外径分别设置为 40 和 70 mm,如图 14 所示。

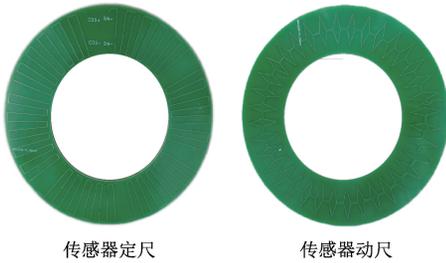


图 14 传感器样机 PCB 实物图

Fig. 14 Photograph of the PCB-fabricated sensor prototype

搭建实验平台如图 15 所示,实验平台搭建在恒温恒湿度环境的超精密实验室内,为避免因噪声或者实验过程振动产生的影响,设置在大理石防震平台上。通过海德汉生产的圆光栅 RON-866 进行误差标定来测量时栅角位移传感器精度,海德汉 RON-866 的系统精度为±1",将实验样机与海德汉光栅传感器同轴安装以实现两者同步运动,其数据由信号处理电路采集再通过串口上传到上位机进行分析。



图 15 传感器实验平台

Fig. 15 Sensor experiment platform

#### 3.2 实验验证分析

传感器感应线圈输出的原始信号如图 16 所示,其幅值达到了 56 mV,可以看出传感器感应信号受到外界环

境干扰,线圈之间存在互感,需要对其进行差分放大,再滤波使其变得平滑才能解调信号。

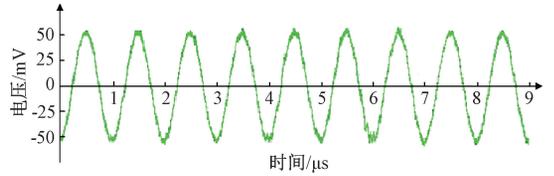


图 16 传感器原始感应信号

Fig. 16 The raw sensing signal of the sensor

对传感器进行稳定性测试,如图 17 所示,保证传感器定尺与动尺不发生相对角位移,每隔一段时间进行一次数据采集,读取保持不动的情况下传感器的位移数据,测量其波动性来判断传感器的稳定性,本次实验共采集 2 000 个点。由图 17 可知,角位移波动幅值为±5.7"。

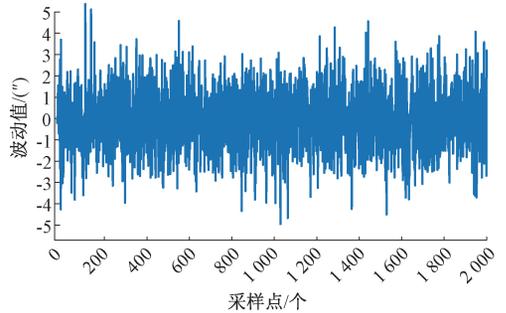


图 17 传感器稳定性测试

Fig. 17 Sensor stability test

对传感器样机进行最佳安装间隙验证实验,设置传感器安装间隙分别为 0.5、0.6、0.7 mm,让动尺以 0.2°步长相对定尺移动一个对极节距(10°),将传感器测量值与圆光栅测量值作差得到误差曲线并对其进行快速傅里叶变换得到误差频次,不同安装间隙下误差对比如表 4 所示,其中传感器在安装间隙为 0.6 mm 时误差峰峰值最小,为 82.7",主要误差频次为二次误差,与仿真部分结果一致。

表 4 传感器不同安装间隙下误差对比

Table 4 Error comparison of sensor with different installation gaps

气隙间隙 /mm	误差峰峰值 /(")	主要误差频次	主要误差频次幅值/(")
0.5	98.5	二次	34.2
0.6	82.7	二次	29.4
0.7	103.7	二次	31.9

对传感器样机进行对极内误差测试,传感器对极数为 36 对极即 10°为一个对极,其间设置 50 个等距采样

点。另外制作一种激励线圈不变、感应线圈采用传统单层耦合结构的时栅角位移传感器试验样机,在安装间隙为 0.6 mm 对其进行同样设置的极内误差测试。将两种传感器的极内误差曲线与误差频谱图进行比较分析如图 18 所示。

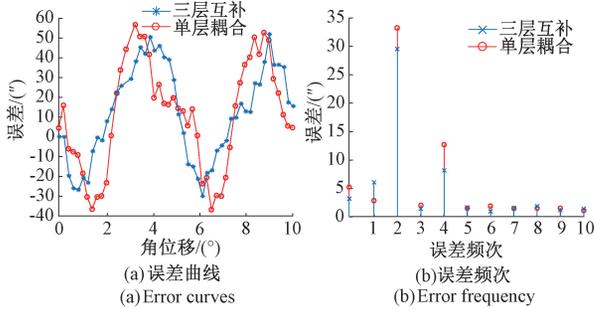


图 18 传感器极内误差分析

Fig. 18 Error analysis of the sensor within one pole pitch

从图 18 可以看出,采用三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器极内误差峰峰值为 82.7",误差主要成分为二次误差,其幅值为 29.4",符合模拟仿真结果,但相较于仿真误差分析,其一次、二次和四次误差均有所增加,一次误差的增加是由传感器线圈之间的互感信号引起的;二次误差的增加是由激励信号幅值不等、相位不正交引起的;四次误差的增加是由传感器电场不均匀引起的。另外,采用传统单层线圈耦合结构的传感器对极内误差峰峰值为 94.6",二次误差幅值为 33.1",由此可知,采用三层互补形状线圈组合结构在提高传感器感应信号幅值与稳定性的同时,测量精度相较于传统结构提高了 12.6%。

传感器整周期测试误差分析如图 19 所示,驱动电机使传感器动尺相对于定尺匀速旋转一周,步距设置为 0.5°,即设置 720 个采样点,得到整周期误差曲线。由图可知传感器的整周期误差在  $[-24.9", 78.5"]$ ,峰峰值为 103.4",符合传感器测量要求。

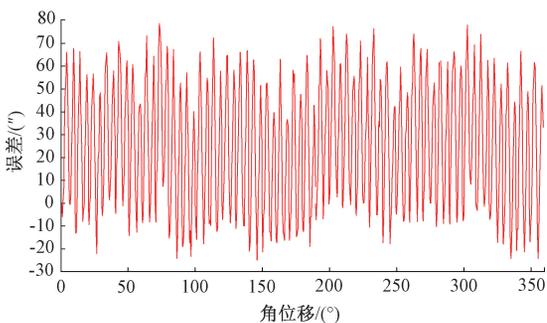


图 19 传感器整周期误差分析

Fig. 19 Full-period error analysis of sensor

对传感器样机进行误差随温度变化测试实验,将传感器样机置于高低温试验箱内,设置温度由室温 25℃ 上升至 55℃,每上升 10℃ 设置一个采样点,同样设置传感器安装间隙为 0.6 mm,动尺相对定尺移动一个对极节距 (10°),测量在不同温度下的传感器样机对极内误差。不同温度下误差对比如表 5 所示,其中传感器对极内误差峰峰值随温度上升而逐渐增大,峰峰值由 82.7" 上升至 104.7"。

表 5 传感器不同温度下误差对比

Table 5 Error comparison of sensor at different temperatures

温度/℃	误差峰峰值/(")
25	82.7
35	88.3
45	95.5
55	104.7

## 4 结 论

为了进一步提高磁场式时栅角位移传感器的时变磁场有效面积利用率和磁场拾取能力,提高传感器的稳定性和感应信号幅值从而提高信噪比,本研究提出了一种三层互补形状线圈组合结构的新型时栅角位移传感器。本研究首先对传感器的气隙磁场进行了理论分析,根据毕奥-萨伐尔定律建立空间磁场分布模型,提出并研究了平面线圈气隙磁场分层耦合理论,以此将气隙磁场分为 3 种类型;其次建立了三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器测量模型,激励线圈采用双层互补式结构,使线圈两端对磁场的约束能力相互补偿让磁场分布更均匀,感应线圈采用三层互补形状线圈组合结构,不同形状线圈耦合不同类型气隙磁场,使传感器信号幅值与稳定性大幅提高;再对传感器测量模型进行仿真实验,通过分析传感器输出波形信号,发现相较于气隙磁场单层耦合的方式,采用三层互补形状线圈组合结构使传感器感应信号的幅值提高了 121.1%,通过对仿真信号进行误差分析,发现该传感器感应信号更稳定且误差更小;最后搭建实验平台,制作三层互补形状线圈组合结构的时栅角位移传感器样机并进行实验验证。实验结果表明传感器原始信号强度为 56 mV,对传感器进行稳定性测试,角位移波动幅值为  $\pm 5.7"$ ,最佳安装间隙为 0.6 mm,对极内误差峰峰值为 82.7",测量精度相较于传统结构提高了 12.6%,整周误差峰峰值为 103.4"。本实验为磁场式时栅角位移传感器研究提供了一种有效思路,对后续的时栅角位移传感器研究具有一定指导意义。

## 参考文献

- [1] 程强, 徐文祥, 刘志峰, 等. 面向智能绿色制造的机床装备研究综述[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 31-38.  
CHENG Q, XU W X, LIU ZH F, et al. A review of machine tool equipment research for intelligent green manufacturing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 31-38.
- [2] YUAN CH X, LI G Y, KAMARTHI S, et al. Trends in intelligent manufacturing research: A keyword co-occurrence network based review [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 33(2): 425-430.
- [3] NOOR-A-RAHIM M, FIRYAGUNA F, JOHN J, et al. Toward industry 5.0: Intelligent reflecting surface in smart manufacturing[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(10): 72-76.
- [4] 高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 741-752.  
GAO X, LI SH J, MA Q L, et al. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. Chinese Optics, 2019, 12(4): 741-752.
- [5] 五部委联合印发《关于加强国家现代先进测量体系建设的指导意见》[J]. 传感器世界, 2022, 28(3): 38.  
Five ministries and commissions. Guiding Opinions on Strengthening the Construction of National Modern Advanced Measurement System[J]. Sensor World, 2022, 28(3): 38.
- [6] 《中国制造 2025》解读之: 制造强国“三步走”战略[J]. 工业炉, 2024, 46(5): 30.  
Interpretation of “Made in China 2025”: The “three-step” strategy for building a manufacturing powerhouse[J]. Industrial Furnace, 2024, 46(5): 30.
- [7] 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(19/21): 1492-1498.
- [8] 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 ZH H, SUN D CH, et al. Present situation and development of modern precision measurement technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1869-1878.
- [9] KUMAR A S A, GEORGE B, MUKHOPADHYAY S C. Technologies and applications of angle sensors: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7195-7206.
- [10] MATSUKUMA H, MADOKORO S, ASTUTI W D, et al. A new optical angle measurement method based on second harmonic generation with a mode-locked femto-second laser [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2019, 2(4): 187-198.
- [11] 董良浩. 时变磁场精确约束方法及其在时栅传感器中应用研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.  
DONG L H. Study on precise constraint method of time-varying magnetic field and its application in time grating sensor[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.
- [12] 付航. 双层时栅角位移传感器结构优化与精度分析[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.  
FU H. Structural optimization and precision analysis of double-layer time grid angular displacement sensor[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [13] 张天恒, 彭东林, 王阳阳, 等. 绝对式角位移传感器的研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(6): 1-16.  
ZHANG T H, PENG D L, WANG Y Y, et al. A review of research on absolute angular displacement sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(6): 1-16.
- [14] 余定峰, 蒲红吉, 王合文, 等. 绝对式角位移时栅测量系统设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(7): 153-160.  
YU D F, PU H J, WANG H W, et al. Design of absolute angular displacement time-grating measurement system[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(7): 153-160.
- [15] 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): 90-98.  
LIU X K, LIU K, PU H J, et al. High-precision multi-turn absolute time-grating angular displacement sensor based on re-modulation scheme[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 90-98.
- [16] LIU X K, ZHAN B N, YU ZH CH, et al. A

- miniaturized capacitive absolute angular positioning sensor based on a dual two-stage secondary re-modulation scheme with time-division multiplexing[J]. *Sensors and Actuators, A. Physical*, 2020, 310: 112043.
- [17] 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): 107-114.
- ZHU G, YU X Y, FU M, et al. Research on high precision adaptive digital phase shift method[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(2): 107-114.
- [18] 彭东林. 时栅传感器的技术现状、发展趋势和思想延伸[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 128-134.
- PENG D L. Technological status, development trend and thought extension of time grating sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 128-134.
- [19] PENG K, WANG ZH X, FAN X CH, et al. Design and optimization of large-range absolute linear displacement sensors based on splicing technology[J]. *Measurement*, 2025, 242 PB: 115943.
- [20] 高忠华, 万家烙. 时栅角度角速度同步测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 98-104.
- GAO ZH H, WAN J L. Research on simultaneous measurement method of angular position and angular speed for time grating[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 98-104.
- [21] 陈鸿友, 张桁潇, 余海游, 等. 多场耦合绝对式时栅角位移传感器误差分析及优化[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2023, 37(7): 120-128.
- CHEN H Y, ZHANG H X, YU H Y, et al. Error analysis and optimization of multi field coupling absolute time grating angular displacement sensor[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(7): 120-128.
- [22] 桂强. 双层互补型绝对式时栅角位移传感器设计与参数优化[D]. 重庆:重庆理工大学, 2024.
- GUI Q. Design and parameter optimization of double-layer complementary absolute time grid angle displacement sensor[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024.
- [23] 陈自然, 张桁潇, 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 ZH Y, et al. Magnetic field time-grating displacement sensor based on discrete winding and its error characteristics[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2023, 31(19): 2836-2849.
- [24] 杨继森, 熊浩, 文杰, 等. 基于气隙磁场分层耦合的直线时栅位移传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 116-125.
- YANG J S, XIONG H, WEN J, et al. Research on linear time-grating displacement sensor based on stratified coupling of air gap magnetic field[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 116-125.
- [25] 范兵, 陈锡侯, 肖朝晖, 等. 磁场式位移传感器误差的数理模型研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(5): 985-992.
- FAN B, CHEN X H, XIAO ZH H, et al. Research on mathematical and physical model of magnetic displacement sensor error[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(5): 985-992.
- [26] 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. Influence of electrode geometric error on the measurement accuracy of nanometer time-grating displacement sensor and its suppression method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(7): 21-27.
- [27] 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, 2312.
- YANG J S, ZHOU R, ZHANG T H, et al. Research on magnetic field compensated double-layer time-grating angular displacement sensors under structural parameter constraints[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(19): 2296-2303, 2312.

## 作者简介



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

E-mail: yangjs@cqut.edu.cn

Yang Jisen (Corresponding author) received his B. Sc. degree

from Hubei University of Automotive Technology in 2001, his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Chongqing University in 2003 and 2007, respectively. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision measurement and intelligent sensors.



**罗云沛**, 2023年毕业于重庆理工大学, 获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测量与智能传感器。  
E-mail: luoyyp@stu.cqut.edu.cn

**Luo Yunpei** received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2023. He is currently a master student in Chongqing University of Technology. His main

research interests include precision measurement and intelligent sensors.



**张静**, 2005年于重庆理工大学获得学士学位, 2012年于重庆大学获得硕士学位, 现为重庆理工大学讲师, 主要研究方向为电子信息技术与智能传感器。

E-mail: zjing@cqut.edu.cn

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