

文章编号 1004-924X(2017)01-0172-10

基于平面线圈的高分辨力时栅角位移传感器

鲁 进^{1,2*}, 陈锡侯², 武 亮², 汤其富²

- (1. 重庆理工大学 机械工程学院, 重庆 400054;
2. 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘要:针对现有时栅角位移传感器采用漆包线绕制工艺加工线圈,导致线圈布线不均且容易随时间发生变化进而影响测量精度的问题,提出一种基于 PCB 技术的新型时栅角位移传感器。该传感器通过在 PCB 基板的的不同层上布置特定形状的激励线圈和感应线圈,形成两个完全相同并沿圆周空间正交的传感单元;当在两传感单元的激励线圈中分别通入时间正交的两相激励电流后,通过永磁定子基体和具有特定齿、槽结构的导磁转子对传感单元内的磁场实施精确约束,使两传感单元的感应线圈串联输出初相角随转子转角变化的正弦感应信号;最后通过高频时钟脉冲插补初相角实现精密角位移测量。利用有限元分析软件对传感器进行了建模和仿真。根据仿真模型制作了传感器实物,开展了验证实验,并对实验中角位移测量误差的频次和来源进行了详细分析。经过标定和补偿,最终获得了整周范围内误差在 $-2.82''\sim 2.02''$ 的时栅角位移传感器。理论推导、仿真分析和实验验证均表明,该传感器不仅能实现精密角位移测量,还能在激励线圈和感应线圈空间极距和信号质量不变的情况下,将位移测量的分辨力从信号源头提高 1 倍,且结构简单稳定、极易实现,特别适用于环境恶劣的工业现场。

关键词:角位移测量;平面线圈;高分辨力;时栅;传感器

中图分类号:TH7 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172501.0172

High resolution time grating angular displacement sensor based on planar coils

LU Jin^{1,2*}, CHEN Xi-hou², WU Liang², TANG Qi-fu²

- (1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
 2. Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing 400054, China)
- * Corresponding author, E-mail: jinlu@cqut.edu.cn

Abstract: The measurement accuracy is easily influenced by non-uniformity of coil wiring and variation with time, which is originally because of the use of enameled coils in traditional time grating angular displacement sensor. For this, a new time grating angular displacement sensor based on PCB(Printed Circuit Board) technology was proposed. By arranging particular shapes of excitation and induction coils in different layers of PCB baseboard, the sensor formed two identical sensor units and they were of quadrature positions in the circle; when excitation coils of two sensor units were switched on two-phase time-quadrature AC respectively, magnetic field was precisely restrained by magnetic stator

收稿日期:2016-06-24;修订日期:2016-08-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51505052;No. 51405049);重庆市科技研发基地能力提升计划项目(No. cstc2014pt-sy40002)

base and magnetic rotor with specific teeth and slots to make induction coils of both sensor units in series output sine sense signal with primary phase varying with rotor's rotation; finally, precise angular displacement measurement was achieved by interpolating high-frequency clock pulse into primary phase. The sensor was modeled and simulated by using FEA (Finite Element Analysis) software. According to simulation models, the sensor object was made and confirmatory experiment was carried out. Frequency and source of angular displacement measuring error were analyzed in detail. Ultimately, the measurement error of the new time-grating angular displacement sensor is within $-2.82'' \sim 2.02''$ in the whole scale after calibration and compensation. Theoretical derivation, simulation analysis and experiment verification all indicate that the sensor can not only achieve precise angular displacement measurement, but also it can double the resolving ability of displacement measurement from the signal source when the space pole distance and signal quality of excitation and induction coils are unchanging. The stable structure is easy to be achieved and especially applied to industrial sites in poor environment.

Key words: angular displacement measurement; planar coil; high resolution; time grating; sensor

1 引 言

角位移测量的传感器种类很多,比如光栅传感器、电感式传感器、电容式传感器、激光干涉测量系统等^[1-6]。其中电感式传感器是应用最广泛的一类传感器,虽然其在精度、分辨力和灵敏度等方面不具有太大优势,但其具有抗油、污、水的特性使其尤其适用于环境恶劣的工业现场^[7]。

近年来,为了降低成本、减小体积和重量,相关研究人员对基于 PCB(Printed Circuit Board)技术的电感式传感器的研究越来越多。与传统的绕线技术相比,PCB 技术能更容易实现各种复杂形状的线圈布线,并且其布线均匀。这使得该类传感器更容易消除谐波的影响,从而使其成为具有独特优势的电感式传感器^[8-10]。文献[11]介绍了一种基于 PCB 技术的绝对式直线位移传感器,该传感器采用对称结构来消除电磁干扰,采用了两组感应线圈实现绝对式位移测量,但其测量误差随测量范围的增加成比例增大,当测量范围达到几百毫米时,误差达到微米级甚至更高,测量精度较低;文献[12]和文献[13]分别提出了基于 PCB 技术的绝对式和增量式角位移传感器,但测量精度均较低,文献[12]中传感器的测量误差已达到度以上。文献[14]提出了一种基于平面线圈和端面齿的磁感应式角位移传感器,其经标定补偿后整周范围内的测量误差在 $\pm 6''$ 内。该传感器将 PCB 技术的优势融入时栅传感技术中,使得时栅传感器的性能得以进一步提升^[15-18]。然而,上

述基于 PCB 的传感器的空间分辨力均受限于所布激励或感应线圈的线宽,当线圈宽度达到一定极限后,想进一步提高其空间分辨力将很难。

基于此,本文提出一种基于 PCB 技术的新型时栅角位移传感器,通过在印制电路基板的不同层上布置特定形状的激励和感应线圈,再通过导磁定子基体和转子对两个完全相同的传感单元内的磁场实施精确约束,其可在激励线圈和感应线圈的空间极距和信号质量不变的情况下,将位移测量分辨力从信号源头提高 1 倍,且传感器精度高、结构简单、极易实现。

2 传感器结构及其工作原理

图 1(彩图见期刊电子版)所示的时栅角位移传感器包含定子和转子两部分。其中,转子为齿、槽等宽的导磁体,定子包含导磁基体和紧贴于导磁基体上的印制电路板。通过在定子的印制电路基板上进行布线形成两个完全相同的传感单元,各传感单元分别由布于不同层上的激励线圈和感应线圈组成。

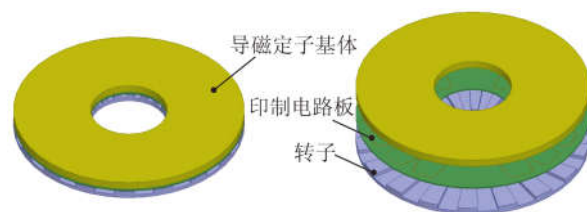


图 1 传感器整体结构及分解图

Fig. 1 Overall and exploded structure diagrams of sensor

图 2 为布于印制电路基板不同层上的激励线圈和感应线圈。其中,激励线圈和感应线圈的电流流向即走线方向,如图中箭头所示。

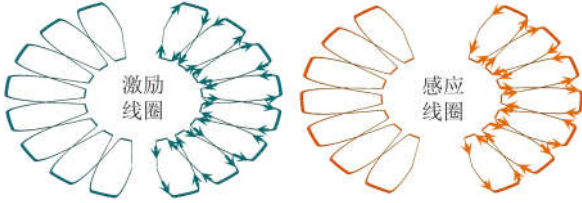


图 2 激励线圈和感应线圈

Fig. 2 Excitation and induction coils

图 3 为两传感单元及其与转子的位置关系。由图 3 可知,两个传感单元的激励线圈和感应线圈相对于转子的齿或槽在空间上错开 $1/8$ 空间极距角。

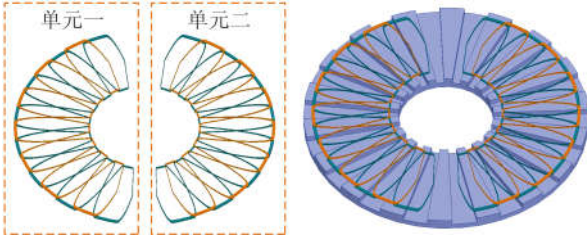


图 3 两个传感单元及其与转子的空间位置

Fig. 3 Two sensing units and their spatial relationship corresponding to rotor

图 2 为传感单元一的激励线圈或感应线圈,其绕线轨迹实际上由两条周期为 W 的分段函数构成,其中 1 条用极坐标方程可表示为:

$$r = \begin{cases} R + h \sin \left[4\pi \frac{\theta}{W} \right], \theta \in \left[iW, \frac{W}{8} + iW \right] \\ R + h, \theta \in \left[\frac{W}{8} + iW, \frac{3W}{8} + iW \right] \\ R - h \sin \left[4\pi \frac{\theta}{W} \right], \theta \in \left[\frac{3W}{8} + iW, \frac{5W}{8} + iW \right] \\ R - h, \theta \in \left[\frac{5W}{8} + iW, \frac{7W}{8} + iW \right] \\ R + h \sin \left[4\pi \frac{\theta}{W} \right], \theta \in \left[\frac{7W}{8} + iW, W + iW \right] \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi_1(t, \theta) = 2M \left(\int_0^{\theta + \frac{\pi}{2N}} 2RhB_1 \sin(2N\theta) d\theta + \int_{\theta + \frac{\pi}{2N}}^{\theta + \frac{\pi}{N}} 2RhB_2 \sin(2N\theta) d\theta \right), \quad (3)$$

$$\varphi_2(t, \theta) = 2M \left(\int_0^{\theta + \frac{\pi}{2N}} 2RhB_1 \cos(2N\theta) d\theta + \int_{\theta + \frac{\pi}{2N}}^{\theta + \frac{\pi}{N}} 2RhB_2 \cos(2N\theta) d\theta \right), \quad (4)$$

式中: N 为感应线圈对应于整周的周期数, $N = 2\pi/W$; M 为感应线圈的实际周期数; B_1 为转子齿

另 1 条用极坐标方程表示为:

$$r = \begin{cases} R - h \sin \left[4\pi \frac{\theta}{W} \right], \theta \in \left[iW, \frac{W}{8} + iW \right] \\ R - h, \theta \in \left[\frac{W}{8} + iW, \frac{3W}{8} + iW \right] \\ R + h \sin \left[4\pi \frac{\theta}{W} \right], \theta \in \left[\frac{3W}{8} + iW, \frac{5W}{8} + iW \right] \\ R + h, \theta \in \left[\frac{5W}{8} + iW, \frac{7W}{8} + iW \right] \\ R - h \sin \left[4\pi \frac{\theta}{W} \right], \theta \in \left[\frac{7W}{8} + iW, W + iW \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: W 为空间极距角;对于激励线圈, i 依次取 $0 \sim q$ 之间的整数, $0 \leq q < \pi/W$, 对于感应线圈,为尽可能地减小边缘的影响且产生尽可能大的感应电势, i 可比激励线圈少半周期。

当两个传感单元的激励线圈中分别通入两相对称激励电流 $I_1(t) = A \sin(\omega t)$ 和 $I_2(t) = A \cos(\omega t)$, 在定子导磁基体和转子导磁体的约束下,空间磁场(其方向垂直于图中的极坐标平面,沿 z 方向为正)将随转子的齿或槽呈周期性规律分布,如图 4 所示。

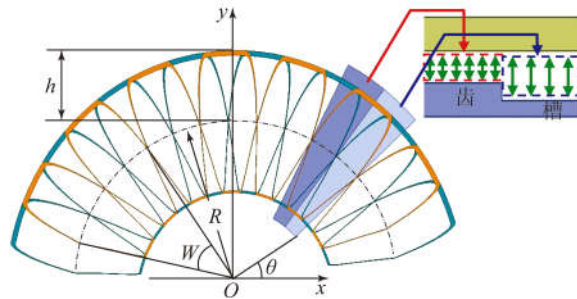


图 4 定子与转子间的磁场

Fig. 4 Magnetic field between stator and rotor

由图 4 可知,当激励线圈中通入激励电流后,转子齿和槽所覆盖区域内的磁通密度将不同。考虑激励和感应线圈的绕线形状,可计算出两传感单元感应线圈内的磁通分别为:

覆盖区域的磁通密度; B_2 为转子槽覆盖区域的磁通密度。

在两相对称激励电流 $I_1(t) = A\sin(\omega t)$ 和 $I_2(t) = A\cos(\omega t)$ 的分别作用下, B_1 和 B_2 可表示为:

$$B_1 = \frac{n_1 I_1(t)}{rR_1 S_1} (j=1,2), \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{n_1 I_2(t)}{rR_2 S_2} (j=1,2), \quad (6)$$

$$\varphi_1(t, \theta) = \frac{4MRhn_1 A(R_2 S_2 - R_1 S_1) \sin(\omega t) \cos(2N\theta)}{rNR_1 S_1 R_2 S_2}, \quad (7)$$

$$\varphi_2(t, \theta) = \frac{4MRhn_1 A(R_1 S_1 - R_2 S_2) \cos(\omega t) \sin(2N\theta)}{rNR_1 S_1 R_2 S_2}, \quad (8)$$

两激励在两感应线圈产生的感应电势分别为:

$$e_1(t, \theta) = -n_2 \frac{d\Phi_1(t, \theta)}{dt} = \frac{4MRhn_1 n_2 \omega A(R_1 S_1 - R_2 S_2) \cos(\omega t) \cos(2N\theta)}{rNR_1 S_1 R_2 S_2}, \quad (9)$$

$$e_2(t, \theta) = -n_2 \frac{d\Phi_2(t, \theta)}{dt} = \frac{4MRhn_1 n_2 \omega A(R_2 S_2 - R_1 S_1) \sin(\omega t) \sin(2N\theta)}{rNR_1 S_1 R_2 S_2}, \quad (10)$$

式中 n_2 为感应线圈匝数。

将两传感单元的感应线圈串联,可得到输出总感应电势:

$$e(t, \theta) = e_1(t, \theta) + e_2(t, \theta) = \frac{4MRhn_1 n_2 \omega A(R_1 S_1 - R_2 S_2)}{rNR_1 S_1 R_2 S_2} \cos(\omega t + 2N\theta). \quad (11)$$

由式(11)可见,被测角位移与感应线圈输出感应电势的初相角呈线性关系。将输出感应电势进行信号处理(低通滤波、放大和过零比较)后送入现场可编程门阵列(FPGA),与参考的同频信号 e_r 进行鉴相处理^[1],如图 5 所示,即可得到转子相对定子的角位移:

$$\theta = \left[k + \frac{\Delta t}{T} \right] \cdot \frac{\pi}{N} (0 \leq k < 2N - 1), \quad (12)$$

式中: k 为转子转动时初相角变化的完整周期数。 k 的值在某些测量场合是允许大于 $2N - 1$ 的,此时传感器的测量范围扩大为多圈。

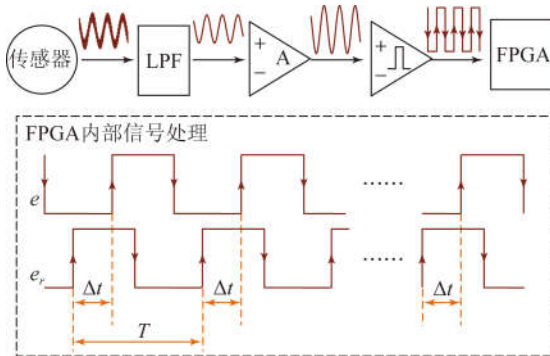


图 5 传感器信号处理示意图

Fig. 5 Diagram of signal process for sensor

式中: n_1 为激励线圈匝数; r 为激励线圈的交流阻抗; R_1 和 R_2 分别为每个齿和槽覆盖区域内的激励线圈所产生磁场磁路的磁阻; S_1 和 S_2 分别为每个齿和槽覆盖区域内感应线圈接收磁通的平均有效面积。

将式(5)和式(6)代入式(3)和式(4),有:

3 建模仿真与误差分析

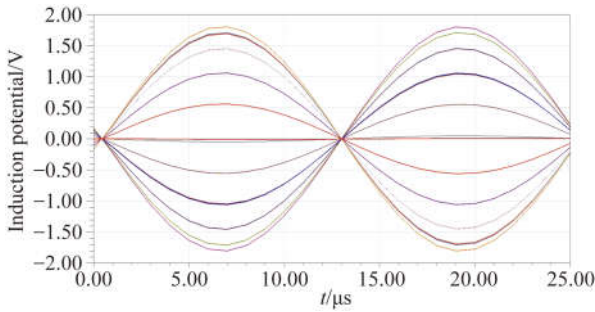
3.1 建模仿真

采用电磁场有限元分析软件 Maxwell 对传感器进行建模和仿真,传感器模型如图 1 所示。图 1 中,传感器基本参数设置如下:定子基体和转子的内、外径分别为 75 mm 和 25 mm,转子槽深 5 mm, $R=50$ mm, $h=20$ mm,空间极距角 $W=40^\circ$ 。感应线圈整周周期数 $N=9$,实际周期数 $M=3.5$ 。两相对称激励电流 $I_1(t) = 0.1\sin(2\pi \cdot 40\,000t)$ A, $I_2(t) = 0.1\cos(2\pi \cdot 40\,000t)$ A,激励线圈和感应线圈匝数各为 5 匝。定子基体和转子相距 0.45 mm。激励线圈和感应线圈材料设置为铜,定子基体和转子材料设置为纯铁。激励线圈和感应线圈网格的最大边长设置为 1 mm,定子基体和转子网格的最大边长设置为 2 mm,真空网格的最大边长设置为 5 mm。

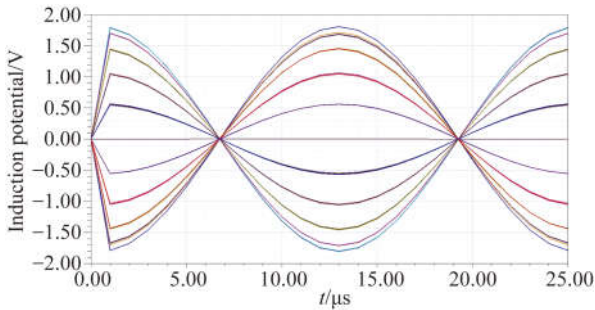
仿真中,设置转子转动 1 个空间极距角 40° ,转动步距角为 1° ,即共对转子的 40 个不同空间位置进行仿真,结果如图 6 所示。

从图 6(c)可以看到,转子转动到不同的空间位置时,相应的输出正弦曲线的初相角不同。转子从起始位置开始,当转动半个空间极距角即 20° 时,对应输出正弦曲线的初相角刚好变化一个完整的圆周,即 2π 即 360° ;当转子转动 1 个空间极距角即 40° 时,对应输出正弦曲线的初相角变化了 4π 即 720° 。因此,与已有角位移传感器相比,该传感器

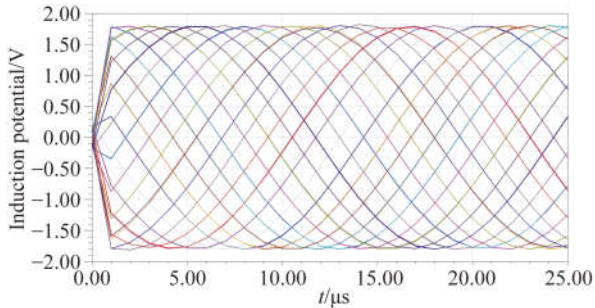
相当于对原始信号进行了两倍细分,故能从信号产生源头将输出信号的分辨力提高一倍。



(a) 传感单元一感应线圈输出的感应电势
(a) EMF of induction coil in sensing unit 1



(b) 传感单元二感应线圈输出的感应电势
(b) EMF of induction coil in sensing unit 2



(c) 两传感单元感应线圈串联输出的感应电势
(c) EMF of induction coils with two sensing units in series

图 6 模型仿真结果

Fig. 6 Simulation results of model

3.2 误差分析

为说明被测角位移与感应线圈输出感应电势的初相角为线性关系,现计算每条正弦曲线的初相角,并令起始位置的初相角为 0。理想情况下,相邻两条正弦曲线的初相角应相差 $\pi/10$ 即 18° 。将仿真图中各条正弦曲线的初相角与理论值相减,可得到当转子转到每个空间位置时,模型的初相角误差,将其转换为对应的转角误差,如图 7 所示。

对图 7 的转角误差进行 FFT(Fast Fourier

Transformation)分析,可得到转角误差的各次谐波成分,如表 1 所示。

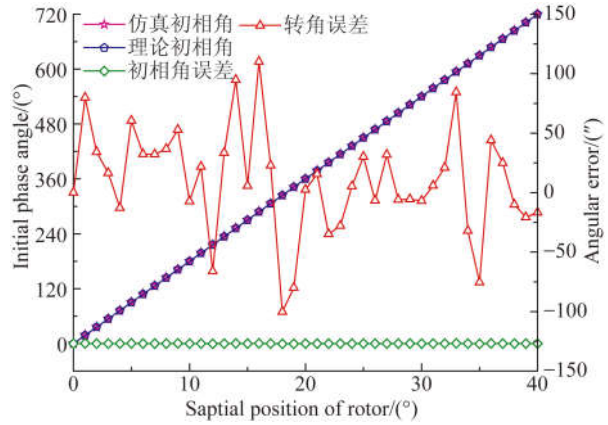


图 7 转子在各空间位置的初相角及其误差

Fig. 7 Initial phase angle and error of rotor in different positions

表 1 转角误差的谐波成分

Tab. 1 FFT of angular error

谐波次数	幅值/(")	相角/rad	谐波次数	幅值/(")	相角/rad
1	16.519	-0.814	9	14.054	-2.229
2	10.659	-2.875	10	25.932	-1.233
3	12.370	-0.761	11	5.379	2.545
4	13.941	-2.935	12	14.920	-0.110
5	19.789	0.373	13	11.992	2.581
6	14.358	-1.249	14	16.350	1.854
7	18.677	2.571	15	11.844	-1.338
8	15.534	-1.481	16	12.586	-2.552

进一步分析可知,上述转角误差产生的主要原因包括:

①传感器的定子包含两个传感单元,根据前面的理论分析,两个传感单元应独立工作,即其磁场互不影响,但实际中两个传感单元间存在串扰,且距离越近串扰越大,故将产生一定的误差。通过进一步分析可知,该类误差主要体现在一次和二次谐波成分上。

②磁场的计算非常复杂,模型中采用导磁的定子基体和转子对磁场的传播路径进行约束,在此约束条件下对磁场进行近似计算,这将引入误差。仿真时假设在转子齿覆盖区域的磁通密度一致,槽覆盖区域的磁通密度一致,而实际中上述区域各点的磁通密度并不相同。对磁场的近似计算主要引起的是转角误差中的四次谐波成分。

③模型中激励线圈或感应线圈的绕线轨迹应满足式(1)和式(2)的表达式,即理想情况下是一条线,而实际中激励线圈或感应线圈是有一定宽度的,这也将引入误差,且主要引入的也是转角误差中的四次谐波成分。

④除上述 3 个主要的模型误差外,在利用有限元分析软件进行仿真时,也会引入误差。如仿真时网格划分所引入的误差,数据计算时的舍入误差、截断误差等等。由仿真引入的误差将分布到转角误差的各次谐波成分上。

⑤仿真图中的各条正弦曲线实际上是由一定数量的离散点绘制而成的,这些离散点的数量由仿真时在时间轴上所设点数而定。因此,根据这些离散点重构正弦曲线并计算各条曲线的初相角时也会引入误差。由初相角计算所引入的误差也将分布到转角误差的各次谐波成分上。

从表 1 中转角误差的谐波成分可知,各次误差幅值相差不大,且无明显规律,因此,根据前面的分析可知,由前 3 种原因引入的转角误差较小,仿真中的转角误差主要是后两方面的原因引起。

4 实验验证

为验证模型测量角位移的有效性,根据仿真模型,制作了图 8(彩图见期刊电子版)所示的 PCB 板,并加工了图 9 所示的导磁基体。

图 8 中,PCB 板为 4 层板,第 1 层和第 2 层布置感应线圈,第 3 层和第 4 层布置激励线圈,空间极距角为 40°。为增强感应信号,激励线圈和感应线圈各并行排布 5 匝,每匝线宽 0.1 mm。其中,中间 1 匝按式(1)和式(2)的理想轨迹布置,两边 2 匝各按 0.2 mm 和 0.4 mm 的中心距依次向外或向内偏移。

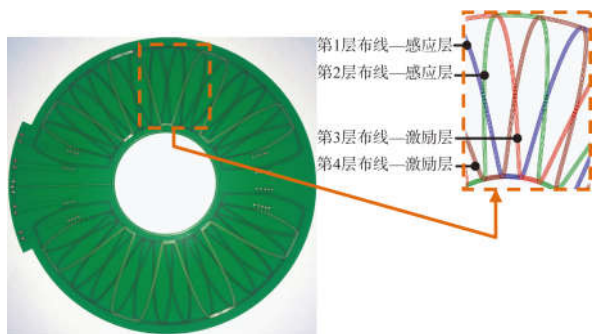


图 8 PCB 板实物

Fig. 8 Prototype of PCB

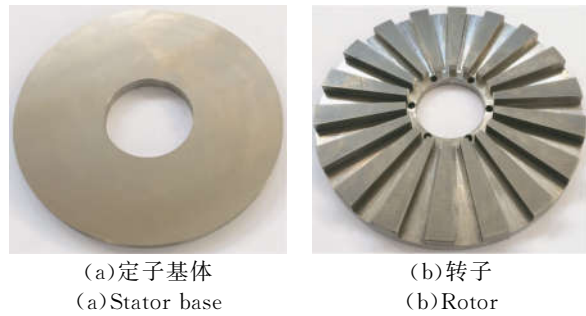


图 9 导磁基体实物

Fig. 9 Pictures of ferromagnetic base

为验证仿真分析结果,搭建了图 10 所示的精密实验平台进行角位移测量。图 10 中,花岗石平板上固定数控回转工作台,其上安装回转芯轴;芯轴中部与海德汉公司角度编码器 RON886(精度 ±1'')的转子联接,上部则通过接盘与传感器样机的转子相联。测量时,工控机通过调用 PMAC 卡的运动控制程序,控制数控回转工作台带动回转芯轴运动和定位,传感器样机输出的感应信号与 RON886 角度编码器产生的信号经过信号处理电路后送入计算机同步显示,从而实现传感器样机和 RON886 角度编码器对回转角位移的同步测量。

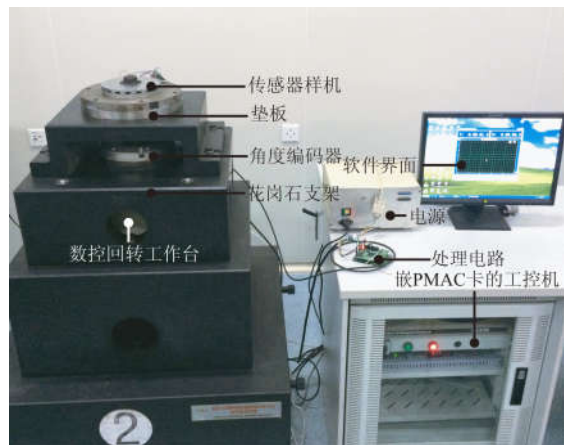


图 10 精密实验平台

Fig. 10 Picture of platform in high precision experiment

实验时,首先通过数控回转工作台控制回转芯轴带动转子旋转,将传感器样机输出的感应信号(经滤波和放大后的正弦信号)送入示波器进行显示并观察。可以看到,在回转芯轴带动转子旋转的过程中,正弦信号不断向前或向后移动,其初相角不断发生变化。当转子沿同一方向旋转 1 个

空间极距角 40° 后, 正弦信号的初相角变化了两个完整的 2π ; 当转子旋转一整周后, 正弦信号的初相角变化了 18 个完整的 2π 。这与仿真结果一致, 进一步验证了该传感器能从信号产生源头将输出信号的分辨力提高 1 倍。随后, 再次通过数控回转工作台控制回转芯轴带动转子旋转一整周作为 1 个测回, 将 RON886 角度编码器作为参考基准, 将其测量值作为标准值, 得到传感器样机在整周范围内的测量误差, 如图 11 所示。

5 误差分析

由图 11 可知, 在回转芯轴旋转 1 周即 $0 \sim 360^\circ$ 的测量范围内, 样机误差呈现出了极强的规律性, 误差在整周内共出现 18 次明显的周期性变化, 这是由于转子旋转一整周, 感应信号的初相角变化了 18 个完整的 2π 所致。同时, 由于在整周范围内, 还存在低次误差, 故整周范围内 18 个周期误差又略有不同。

对图 11(a) 所示的测量误差进行 FFT 分析, 可得到测量误差前 16 次谐波的幅值和相角, 如表 2 所示。

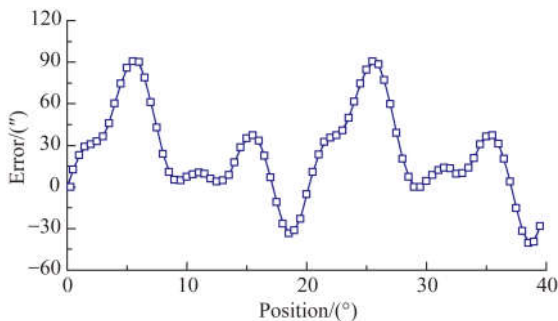
表 2 测量误差的谐波成分

Tab. 2 FFT of measuring error

谐波次数	幅值/($''$)	相角/rad	谐波次数	幅值/($''$)	相角/rad
1	0.683	3.069	9	0.985	-0.819
2	28.276	-1.842	10	1.303	-1.430
3	1.787	3.102	11	0.446	-0.752
4	30.878	-2.998	12	0.984	-1.367
5	1.430	-0.564	13	0.479	-0.977
6	3.682	-1.070	14	0.671	-0.982
7	0.323	0.435	15	0.364	-0.446
8	15.849	-1.148	16	0.343	0.463

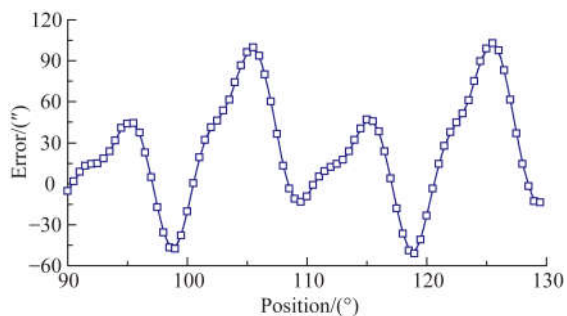
由表 2 和图 11(a) 均可以看到, 在一个空间极距内, 误差幅值较大的为 2 次、4 次和 8 次误差, 其余各次误差幅值均较小。

根据前面对误差的分析可以看到, 极距内的 1 次和 2 次误差主要是由两传感单元间的相互串扰引起的, 而极距内的 4 次误差主要是由对磁场的近似计算和激励线圈或感应线圈的绕线轨迹与理想轨迹不一致引起的, 上述误差是由模型本身的不完善带来的, 可将它们统称为模型误差。除了上述模型误差外, 以下原因还将引起较大的角位移测量误差。



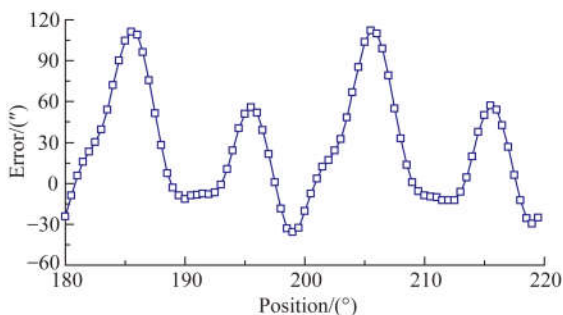
(a) $0^\circ \sim 40^\circ$ 区间误差

(a) Error in the interval of $0^\circ \sim 40^\circ$



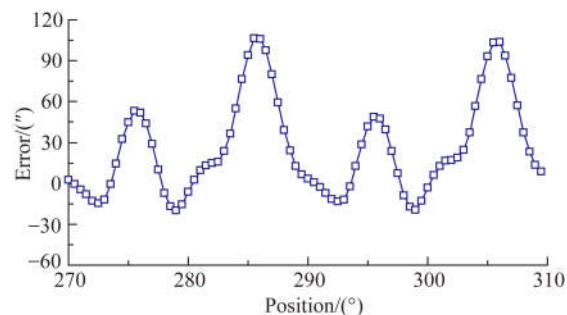
(b) $90^\circ \sim 130^\circ$ 区间误差

(b) Error in the interval of $90^\circ \sim 130^\circ$



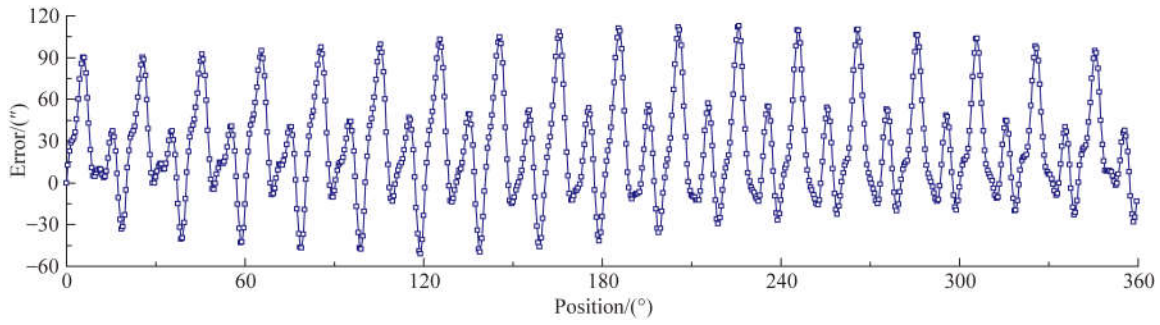
(c) $180^\circ \sim 220^\circ$ 区间误差

(c) Error in the interval of $180^\circ \sim 220^\circ$



(d) $270^\circ \sim 310^\circ$ 区间误差

(d) Error in the interval of $270^\circ \sim 310^\circ$



(e)0°~360°区间误差
(e)Error in the interval of 0°~360°

图 11 传感器在整周范围内的测量误差

Fig. 11 Measurement error of sensor in a whole range

当激励线圈中施加激励电流时,在没有导磁体的情况下,感应线圈内的磁通应为零(即正负方向的磁通应相互抵消),但实际中印制电路板在布线时会有走线偏差,使得感应线圈内正负方向的磁通在没有转子导磁体的情况下无法完全抵消,存在一定的感应信号残余。由于当转子转动 1 个空间极距时,正弦信号的初相角变化两个完整的

2π ,故上述感应信号残余将在一个空间极距内引起较大的 2 次误差。

模型中,要求激励线圈中通入的两相激励电源幅值相等,相位互差 90° ,但实际中,两相激励电源的幅值不可能完全相等。若两相激励电源幅值不等,则根据式(9)和式(10),式(11)变为:

$$\begin{aligned}
 & A' \cos(\omega t) \cos(2N\theta) - A'' \sin(\omega t) \sin(2N\theta) \\
 &= \sqrt{\left[\frac{(A'+A'')}{2} - \frac{(A''-A')}{2} \cos(4N\theta) \right]^2 + \left[\frac{(A'-A'')}{2} \sin(4N\theta) \right]^2} \cdot \\
 & \quad \sin\left[(\omega t + 2N\theta) + \arctan \frac{(A'+A'') - (A''-A') \cos(4N\theta)}{(A'-A'') \sin(4N\theta)} \right]. \tag{13}
 \end{aligned}$$

由式(13)可以看出,两相激励电源幅值不等,会引入 1 个极距呈 4 次及其整数倍次变化的初相角误差 Δ :

$$\Delta = \arctan \frac{(A'+A'') + (A''-A') \cos(4N\theta)}{(A'-A'') \sin(4N\theta)}, \tag{14}$$

即产生表 2 中较大的 4 次和 8 次位移测量误差。

此外,电气误差(如激励线圈阻抗不一致、处理电路参数偏差),机械加工误差,安装误差(如安装不同心、不平行)等也会引起位移测量误差。

从图 11(d)还可以看到,与极距内误差相比,整周误差总体较小,但不管是极距内误差还是整

周误差,幅值较大的均为其内的低次误差,因此,图 11 的误差绝大部分为系统误差,可以通过标定补偿的方法将其减小或消除。图 12 是用 RON886 角度编码器的测量值对传感器样机进行标定和补偿后,回转芯轴再次旋转 1 周得到的样机误差。由图 12 可知,经过标定和补偿后,传感器在整周的测量误差为 $-2.82'' \sim 2.02''$ 。图 13 是标定和补偿前后传感器在整周范围内测量误差的对比图,可以看到,经过标定和补偿后,误差已大大降低。

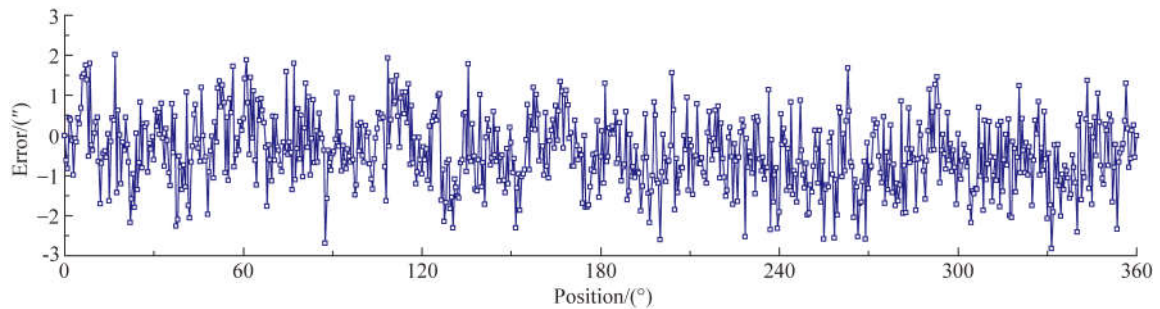


图 12 经过标定和补偿后传感器在整周范围内的测量误差

Fig. 12 Measurement error of sensor after calibration in a whole range

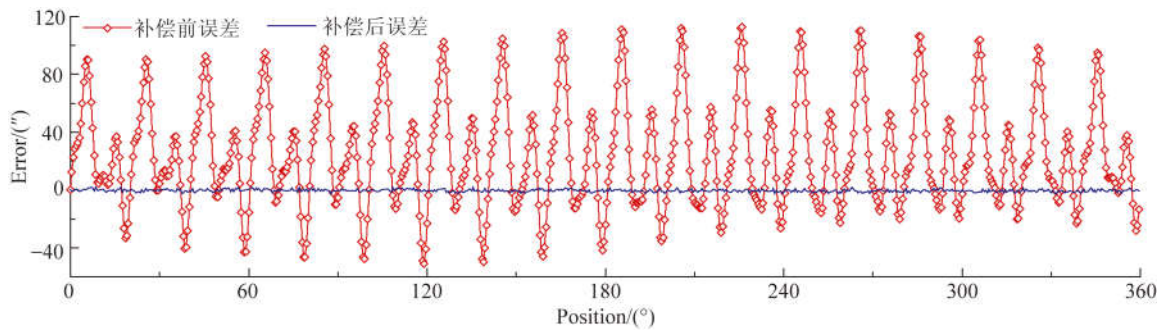


图 13 标定和补偿前后传感器在整周范围内的测量误差对比

Fig. 13 Measurement error of sensor before and after calibration in a whole range

6 结 论

本文提出了一种基于 PCB 技术的新型时栅角位移传感器,通过理论分析、模型仿真和实验验证,可以得到如下结论:

本文提出的基于平面线圈的高分辨力时栅角位移传感器能通过两路驻波信号合成测量所需的感应信号,再通过插补高频时钟脉冲进行鉴相得到转子相对定子转过的角位移,同时还能在空间极距不变的情况下将角位移测量的分辨力从信号源头提高 1 倍。

位移测量误差具有极强的规律性,主要表现

为较大的极距内误差、较小的整周误差。极距内误差中,2 次、4 次和 8 次误差占据绝大部分。其中,2 次误差主要是由印制电路板上激励线圈和感应线圈的走线出现偏差导致在没有转子的情况下感应信号出现残余所引起;4 次和 8 次误差则主要是由激励线圈中通入的两相激励电源幅值不等所引起的。

利用 RON886 角度编码器对样机进行标定和补偿后,传感器在整周范围内的测量误差为 $-2.82'' \sim 2.02''$,传感器结构简单稳定、极易实现。

本研究为低成本下的高精度时栅位移传感器的设计和研制提供了可靠的理论依据,同时对时栅位移传感器后续的研究和设计也指明了方向。

参考文献:

- [1] DZIWIŃSKI T. A novel approach of an absolute encoder coding pattern [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(1):397-401.
- [2] NAQUI J, MARTÍN F. Angular displacement and velocity sensors based on electric-LC(ELC) Loaded microstrip lines [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(4):939-940.
- [3] NAQUI J, MARTÍN F. Transmission lines loaded with bisymmetric resonators and their application to angular displacement and velocity sensors [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(12):4700-4713.
- [4] HORESTANI A K, ABBOTT D, FUMEAUX C. Rotation sensor based on horn-shaped split ring resonator [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(8):3014-3015.
- [5] BARTSCH H, GEILING T, MÜLLER J. A LTCC low-loss inductive proximity sensor for harsh environments [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012 (175):28-34.
- [6] 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*, 2015 (3):768-775.
- [7] FIGUEIREDO J. Resolver models for manufacturing [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(8):3693-3700.
- [8] HWANG S H, KIM H J, KIM J M, *et al.*. Compensation of amplitude imbalance and imperfect quadrature in resolver signals for PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, 47(1):134-143.
- [9] HOSEINNEZHAD R, BAB-HADIASHAR A, HARDING P. Calibration of resolver sensors in electromechanical braking systems: A modified recursive weighted least-squares approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(2):1052-1060.

- [10] SARMA S, VENKATESWARALU A. Systematic error cancellations and fault detection of resolver angular sensor using a DSP based system [J]. *Mechatronics*, 2009, 19(8):1303-1312.
- [11] ASCHENBRENNER B, ZAGAR B G, MEMBER S. Analysis and validation of a planar high-frequency contactless absolute inductive position sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(3):768-775.
- [12] ZHANG Z, NI F, DONG Y, *et al.*. A novel absolute angular position sensor based on electromagnetism [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013(194):196-203.
- [13] YE L, YANG M, XU L, *et al.*. Optimization of inductive angle sensor using response surface methodology and finite element method [J]. *Measurement*, 2014(48):252-262.
- [14] TANG Q F, PENG D L, WU L, *et al.*. An inductive angular displacement sensor based on planar coil and contrate rotor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(7):3947-3954.
- [15] 彭东林, 刘小康, 张兴红. 高精度时栅位移传感器研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(12):126-129.
PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, *et al.*. Research on high-precision time-grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12):126-129. (in Chinese)
- [16] 刘小康, 彭凯, 王先全, 等. 纳米时栅位移传感器的理论模型与误差分析[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(5):1136-1142.
LIU X K, PENG K, WANG X Q, *et al.*. Theoretical model and error analysis of nanometer time grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5):1136-1142. (in Chinese)
- [17] 鲁进, 陈锡侯, 武亮, 等. 变耦型时栅位移传感器理论模型与误差研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(3):561-569.
LU J, CHEN X H, WU L, *et al.*. Study on the theoretical model and error characteristics of variable coupling time grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3):561-569. (in Chinese)
- [18] 彭东林, 李彦, 付敏, 等. 用于极端和特殊条件下机械传动误差检测的寄生式时栅研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(2):359-365.
PENG D L, LI Y, FU M, *et al.*. Study on parasitic time grating sensors used for mechanical transmission error measurement under harsh and special environment [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2):359-365. (in Chinese)

作者简介:



鲁进(1980—),女,重庆人,硕士,副教授,2003年、2006年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,现为重庆理工大学机械工程学院副教授,主要从事精密测量与智能传感器方面的研究。E-mail:jinlu@cqut.edu.cn



陈锡侯(1976—),男,福建漳州人,教授,硕士生导师,1999年、2004年、2007年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为重庆理工大学教授,主要从事精密测量与智能传感器方面的研究。E-mail:cxh0458@cqut.edu.cn

(本栏目编辑:马健)