

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108556

非接触电感式角位移传感器的设计与校准*

陈小丽^{1,2}, 张波^{1,2}, 李杰^{1,2}, 田跃^{1,2}

(1. 北京科技大学数理学院 北京 100083; 2. 北京市弱磁检测及应用工程技术研究中心 北京 100083)

摘要:本文设计了一种非接触电感式角位移传感器,该传感器由定子和转子组成,其中转子由扇形铜箔获得,定子包含一组激励线圈,一组接收线圈以及后续处理电路。当给激励线圈通入交变电流时,相邻两个接收线圈产生的感应电动势大小相等,方向相反,此时感应电压为0,当转子在接收线圈上方转动时,转子中产生的涡流会导致相邻两个接收线圈感应电压产生不同的变化,经过理论与仿真分析,验证了随着转子的转动,接收线圈中感应电压的幅值呈现正余弦变化。本文编写算法对正余弦信号进行识别与校准,以定位精度为 0.0003° 的高精度时栅转台为基准对样机进行测试,结果表明校准完成后,在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 范围内该传感器误差为 0.1° ,满足实际生产需求,验证了该方案的可行性。

关键词:电感式传感器;角位移传感器;误差校准

中图分类号: TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Design and calibration of the non-contact inductive angular displacement sensor

Chen Xiaoli^{1,2}, Zhang Bo^{1,2}, Li Jie^{1,2}, Tian Yue^{1,2}

(1. School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Detection and Application for Weak Magnetic Field, Beijing 100083, China)

Abstract: In this article, a non-contact inductive angular displacement sensor is designed, which consists of a stator and a rotor. The rotor is obtained from the sector-shaped copper foil. The stator contains a set of excitation coils, a set of receiving coils and subsequent processing circuits. When an alternating current is applied to the excitation coil, the induced electromotive force generated by the two adjacent receiving coils is equal in magnitude and opposite in direction. Meanwhile, the induced voltage is 0. When the rotor rotates above the receiving coil, the eddy current generated in the rotor will cause and the induced voltages of two adjacent receiving coils have different changes. Through theoretical and simulation analysis, the amplitude of the induced voltages in the receiving coils changes in sine and cosine with the rotor rotation. The algorithm is applied to identify and calibrate the sine and cosine signals, and the prototype is tested with a high-precision time grid turntable with a positioning accuracy of 0.0003° as a reference. Results show that, after the calibration, the sensor error is 0.1° within the range of $0^\circ\sim 360^\circ$. It could meet actual production requirements, and the feasibility of the program is verified.

Keywords: inductive sensor; angular displacement sensor; error calibration

0 引言

角度传感器能将被测物体的角度转变成电信号,它被广泛应用于现代工业的各个领域。文献[1]提出角度传感器按照其内部转子和定子的布局,可分为接触式角度传感器和非接触式角度传感器。接触式角度传感器有

电位计式角度传感器,非接触式角度传感器有电容式、霍尔式、光电式和巨磁阻式等角度传感器。

近年来,文献[2]提出了许多角度位置传感器,如简单电阻式电位器、电容式传感器、光学传感器和磁传感器。然而,文献[3]提出电阻式电位器由于传感器与物体之间的物理耦合,经常会导致磨损和不稳定。文献[4-7]提出电容式传感器体积太大,无法集成到紧凑

的结构中。文献[8-10]提出光学传感器可以实现高精度,但对工作环境要求严格,不能有灰尘、油污等,考虑上述缺陷,磁传感器广泛应用于测量角位置,主要是基于磁致伸缩,磁阻和霍尔效应,但这些磁传感器磁鼓与磁点之间的位置关系对传感器的信号有很大的影响,不利于传感器的安装,且测量精度低,易受外界环境的影响,在某种程度上无法满足小型化的要求,为了解决上述问题,近年来一些新型的电磁感应式角位移传感器得到了一定的发展,例如文献[11]提出的光栅角位移传感器,但是由于其光刻技术工艺复杂,对相关配套技术要求很高,国内在工艺制造方面的技术还不是很成熟,旋转变压器结构简单、耐冲击性强和工作状态稳定,但其测量精度和分辨率不高,文献[12]提出时栅位移传感器虽然精度高,但是若采用增量式的测量方案,必须依靠零点或参考位,传感器抗干扰能力较差,若采用绝对式的测量方案,需要建立粗、精两套传感和测量单元,容易相互影响导致传感器测量精度下降,更会增大传感器体积。

本文设计的电感式角位移传感器体积小,且为中空轴,适用于大多数应用背景,通过后续算法处理,测量精度达到了 0.1° ,能够很好的满足精度要求。

1 基本结构与测量原理

1.1 基本结构

本传感器结构主要分为定子和转子两部分,如图1所示,激励线圈连接到一个高频交流激励源,从而产生一个连续的交变磁场,此时接收线圈产生感应电压,但由于接收线圈是由偶数个极性相反的线圈组成,因此感应电压相互抵消,当金属转子在感应线圈上面转动时,转子表面在交变磁场中产生涡流,涡流在金属转子表面的磁场作用可以产生一个与原始磁场方向相反的新磁场,即涡流磁场^[13]。在涡流磁场的作用下,接收线圈中产生新的感应电压,由于转子位置的不确定性,相邻线圈感应电压存在差异,因此总的感应电压不为0。激励线圈的结构为圆柱形多匝螺旋线圈,接收线圈的结构如图2所示,实线线圈和虚线线圈代表两组相位差为 22.5° 的接收线圈,每组接收线圈由8个弧形线圈组成,如图3所示,转子由4块扇形金属铜箔组成,它们均匀地分布PCB板上。对于后续处理电路,为了提高传感器检测精度,同时考虑到某些领域需要传感器在高转速工况下进行转动角度测量,基于上述需求,在经过大量的比较后最终选用意法半导体研发的具有16位SDADC的STM32F373CCT6单片机。

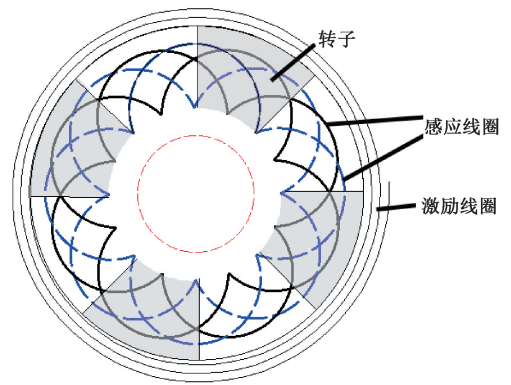


图1 转子和线圈平面结构

Fig. 1 Plane structure of the rotor and coil

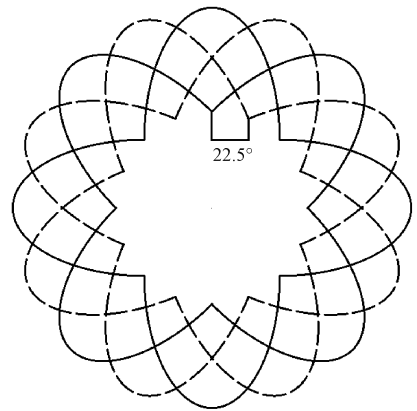


图2 接收线圈结构

Fig. 2 Receiver coil structure

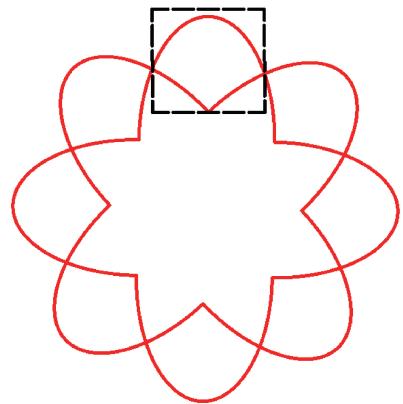


图3 单组接收线圈展开图

Fig. 3 Expanded view of single set of receiving coil

1.2 测量原理

传感器中激励线圈产生交变的电磁场,转子是由导电材料构成的,在交变磁场中转动时会产生涡流,影响它所覆盖的区域的电磁场,从而影响接收线圈的感

应电动势的大小^[3],也就是说感应电动势的大小会随着转子的转动而变化,基于此原理可以测量转子转动的角度,上述电磁耦合原理在本传感器中的具体实现原理如下。

1) 激励线圈产生交变磁场

为了让激励线圈产生匀强交变磁场,将其形状设计为平面螺旋线圈,理论上当通入交变电流时可以产生近似匀强的径向对称的交变磁场^[14],通过 Ansys Maxwell 进行仿真^[15],如图 4 所示的结果验证了这个理论的正确性。

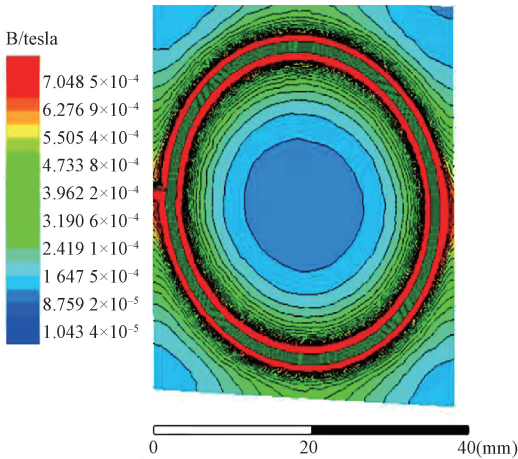


图 4 激励线圈磁感应强度分布图

Fig. 4 Distribution diagram of magnetic induction intensity of excitation coil

2) 转子产生涡流

转子是由导电材料制成的,其在激励线圈产生的交变磁场中产生涡流,此涡流会在转子覆盖的地方削弱与转子平面垂直的磁力线,相应位置的磁场幅值也会减小,因此转子覆盖与没有覆盖的位置磁场幅值存在差异,而这个差异会被接收线圈感应到,随着转子的转动,接收线圈的感应电压随之变化,这正是感应角度的依据所在。

转子的极对数与接收线圈的形状有关,本课题设计的每组接收线圈都是由 8 个极性弧形线圈组成,因此采用四极对的转子,这样可以在转子转动 360° 时产生 4 个周期的正余弦信号,在一定程度上提高了测量精度。

3) 接收线圈感应电压

接收线圈是由以其中心径向对称布置的偶数个极性相反的线圈组成,因为这样的设计可以使无外界干扰时,接收线圈产生的总感应电动势总是 $0^{[9]}$,但转子转动后,由于转子中涡流的存在,导致极性相反的线圈中的感应

电压不同,从而产生的感应电动势不能相互抵消,且随着转子的转动,产生的感应电动势也会不同,从而可以根据接收线圈感应电动势的大小来判断转子转动的角度,转子与接收线圈的耦合过程^[16]如图 5 所示。

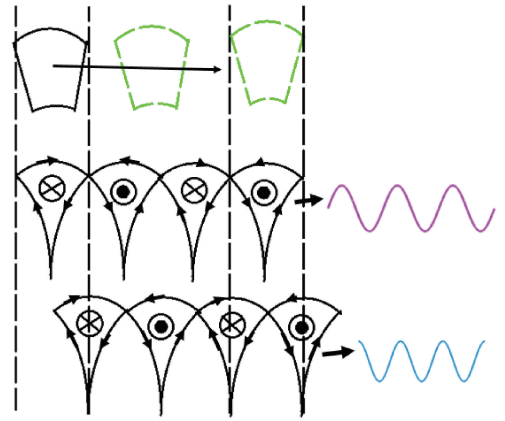


图 5 转子与接收线圈耦合过程

Fig. 5 Coupling process of rotor and receiving coil

2 电磁耦合仿真分析

激励线圈,接收线圈和转子的仿真模型如图 6 所示,转子的仿真模型厚度为 0.6 mm。激励线圈,接收线圈以及转子的中心平面均平行于 $x-y$ 平面,圆心与 z 轴重合,激励线圈的中心在 $z=0$ mm 处,接收线圈中心在 $z=0.2$ mm 处,转子下表面中心在 $z=1$ mm 处,这样接收线圈与转子的距离为 0.8 mm,与激励线圈的距离为 0.2 mm。在仿真分析进行时,给激励线圈加载 5 V, 4 MHz, 初始相位为 0 的交变电流^[8],转子围绕 z 轴转动时,随着转子的转动,可以观察到接收线圈中感应电压的变化。当转子以恒定的角速度旋转时,接收线圈中感应电压的幅值取决于转子的相对位置,由图 7 和 8 可知,两组接收线圈的感应电压幅值都随转子的转动成正弦周期性变化,且具有一定的相位差,这为后续角度解算提供了基础。

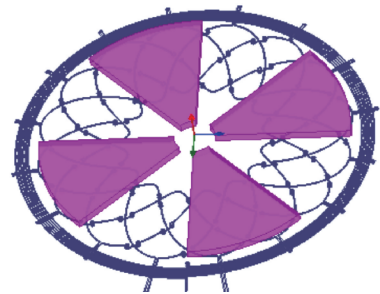


图 6 传感器的电磁耦合仿真模型

Fig. 6 Sensor's electromagnetic coupling simulation model

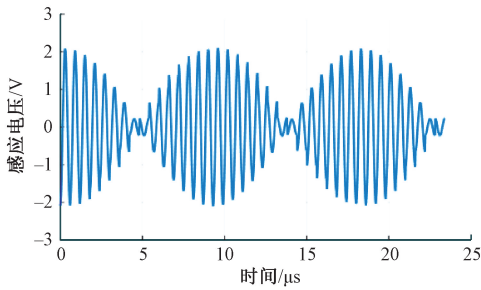


图7 接收线圈1的感应电压

Fig. 7 Induced voltage of the receiving coil 1

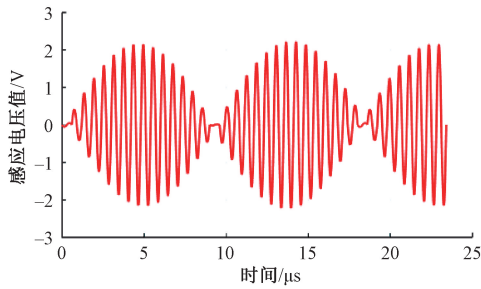


图8 接收线圈2的感应电压

Fig. 8 Induced voltage of the receiving coil 2

3 传感器结构设计

3.1 线圈结构设计

激励线圈为平面螺旋线圈,一般情况下,激励线圈的匝数越多,电感越大,但是并不是匝数越多越好,因为匝数越多一方面占用较大的空间,另一方面会影响振荡频率的大小,从而影响原磁场的电磁耦合性能^[17],因此,出于实际应用的考虑,本论文选择激励线圈的匝数为5,对于线宽线距^[18],如果两者太大,会导致铜线占据面积增大,而铜线正上方的磁场不稳定,会对接收线圈产生干扰,因此线宽线距的选择尽量接近PCB制作工艺的下限,本文选择线宽线距都为0.2 mm,激励线圈印刷在4层PCB板的第2层,接收线圈分为两组,每组由8个极性相反的线圈组成,印刷在PCB的第一层,线圈交叉部分通过过孔连接,在这里,将接收线圈设计在同一层可以保证接收线圈在激励磁场中的原始感应电动势理论上为0,同时保证两组相位差为22.5°的接收线圈输出的感应电压幅值相同,从而减小测量误差,对于转子,由于它的主要作用是在交变磁场中产生涡流,所以转子的材料选用导电材料,本文中转子是由4片扇形铜箔组成,转子厚度为1.2 mm。

3.2 电路模块设计

本文中磁编码器的磁敏感元件选择IPS2200芯片,该芯片用于产生高频激励信号,同时接收感应线圈输出

的感应电压,在经过一定的处理后传输到单片机中,主控模块由STM32F373单片机及相关的配套电路组成,电源模块选择DC-DC电源芯片,为了进一步降低电源纹波,使用LDO电源芯片进行二次稳压,并通过串口与上位机进行通讯。

4 算法设计及校准

4.1 敏感芯片校准

将转子与传感器外壳连接在一起并通过联轴器与电机连接,定子则与外壳通过塑料螺丝连在一起,同时将预留出的正余弦信号接口,I²C通信接口以及GND接口通过瑞萨公司提供的通讯板与配套的上位机通信,将电机带动转子以400 rpm的转速转动,上位机可以自动对原始输出信号进行增益补偿,偏移量补偿,不匹配补偿以及偏置电流校准,其中偏置电流计算如式(1)和(2)所示,通过上位机显示的原始信号波形可以看出,随着转子的转动,原始信号为正余弦形状,验证了电感式角位移传感器理论的正确性。

$$I_{bias} = VDD / (35 \times L \times Q \times F) \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

其中,VDD为芯片供电电压;L为激励线圈电感;Q为发射线圈的因数;F为激励源振荡频率;R为激励线圈电阻;C为与激励线圈并联的电容的容值。

4.2 原始信号校准

对输出的原始数据记录时发现原始数据跳动较大,大约为0.04°,因此首先采用平滑滤波法对单片机接收的原始信号进行滤波,以100个数据为单位进行滤波,滤波之后,数据浮动降低到0.01°,一定程度上减小了测量误差。

原始数据波形为两个接近于三角函数波形的图形,虽然之前已经对敏感芯片的原始输出信号进行了校准,但是相比于标准的正余弦函数,原始数据的波形在振幅对称性、周期对称性等方面仍然存在偏差,所以需要原始数据波形再次正余弦标准化,具体校准过程如下。

首先对原始数据波形进行偏移补偿,此过程如式(3)~(6)所示,

$$C_1 = \frac{\text{Max}(V_{\cos(\theta)}) + \text{Min}(V_{\cos(\theta)})}{2} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{\text{Max}(V_{\sin(\theta)}) + \text{Min}(V_{\sin(\theta)})}{2} \quad (4)$$

$$V'_{\cos(\theta)} = V_{\cos(\theta)} - C_1 \quad (5)$$

$$V'_{\sin(\theta)} = V_{\sin(\theta)} - C_2 \quad (6)$$

其中,Max($V_{\cos(\theta)}$)表示原始电压值的最大值,

$\text{Min}(V_{\sin(\theta)})$ 代表原始电压值的最小值。

第2步,对原始数据两组正余弦波形进行增益补偿,其过程如式(7)~(10)所示,由于转子转动一圈会产生4个周期的正余弦信号,每个周期的信号幅值存在一些差异,因此首先分辨每个周期信号的最值再求平均值,这样能在一定程度上减小幅值差异对增益校准带来的影响,具体过程为:对偏移修正完成后的原始信号进行对比,以正弦信号为例,定义 $V'_{\sin(\theta)}(i)$ 与 $V'_{\sin(\theta)}(i+1)$ 分别表示第 i 个和第 $i+1$ 个数据,如果 $V'_{\sin(\theta)}(i+1)$ 小于 $V'_{\sin(\theta)}(i)$,则输出 $V'_{\sin(\theta)}(i)$,否则输出 0,接下来,如果上一步输出的是 0,则继续输出 $V'_{\sin(\theta)}(i+1)$,否则输出 0,然后在输出的数据中找最大值和最小值,这个最大值和最小值为4个周期的正余弦信号的最大值的极值,将此最大值和最小值求平均值,即为需要的信号最大值,记作 $\text{Max}(V'_{\sin(\theta)})$,信号最小值的选取也用相同的方法。

$$A_1 = \frac{\text{Max}(V'_{\cos(\theta)}) - \text{Min}(V'_{\cos(\theta)})}{2} \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{\text{Max}(V'_{\sin(\theta)}) - \text{Min}(V'_{\sin(\theta)})}{2} \quad (8)$$

$$V''_{\cos(\theta)} = \frac{1}{A_1} V'_{\cos(\theta)} \quad (9)$$

$$V''_{\sin(\theta)} = \frac{1}{A_2} V'_{\sin(\theta)} \quad (10)$$

至此,波形修正基本完毕,将经过修正和未经过修正的波形图进行对比如图9和10所示,可以看出经过修正的波形图已经基本接近标准正弦化。

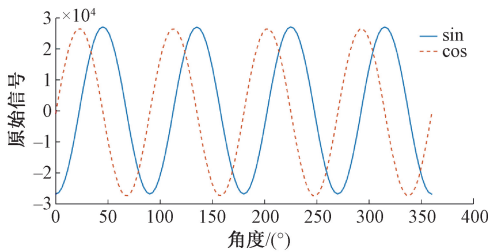


图9 未校准的原始信号

Fig. 9 Uncalibrated raw signal

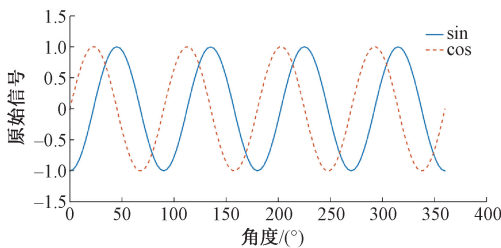


图10 校准后的信号

Fig. 10 Calibrated signal

4.3 角度解算

前面对原始信号进行了校准,结果显示原始信号几乎成为了标准的正余弦信号,接下来需要将原始信号解算为相应的角度,具体解算过程如下。

单周期信号的解算:首先利用反正切函数 atan2 计算出单周期角度 Ang_1 ,角度范围是 $[-180^\circ, 180^\circ]$,由于传感器设计的特殊性,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围会出现4个周期的信号,因此需要将上一步解算出来的角度除以4得到 Ang_2 ,同时为了保证初始位置的角度值为0,将 Ang_2 减去初始位置的角度得到 Ang_3 。

当旋转方向为逆时针时,如果 Ang_3 大于0,则实际角度 Ang 为 $90^\circ - Ang_3$,否则 $Ang = -Ang_3$,如式(11)~(13)所示

$$Ang_1 = \text{atan2}\left(\frac{V''_{\sin(\theta)}}{V''_{\cos(\theta)}}\right) \quad (11)$$

$$Ang_2 = Ang_1/4 \quad (12)$$

$$Ang = \begin{cases} 90^\circ - Ang_3, & Ang_3 > 0 \\ -Ang_3, & Ang_3 \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

当旋转方向为顺时针时,如果 Ang_3 大于0,则实际角度 Ang 为 Ang_3 ,否则 $Ang = 90^\circ + Ang_3$,如式(14)所示

$$Ang = \begin{cases} 90^\circ + Ang_3, & Ang_3 \leq 0 \\ Ang_3, & Ang_3 > 0 \end{cases} \quad (14)$$

周期数识别:通过上面的步骤,我们把每个周期的正余弦信号都解算成了 $0^\circ \sim 90^\circ$,但是我们需要将这4个 $0^\circ \sim 90^\circ$ 合并为1个 $0^\circ \sim 360^\circ$,这就面临周期识别的问题,周期识别不正确很可能会出现角度衔接不均匀甚至角度跳跃的问题,从而增大误差,本文选用角度值作为临界条件,具体识别过程为:定义 Ang_i 为第 i 个角度值,那么:

$$Ang_{i+1} = \left(\frac{Ang_i + 1}{90^\circ}\right) \times 90^\circ + Ang \quad (15)$$

通过式(15),可以识别不同的周期数,从而实现转子转动一周输出 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的效果。

5 标准转台与测试结果

为了检验传感器在实际环境中的应用,选用实验室的高精度时栅作为标准转台,该转台的定位精度为 0.0003° ,将传感器安装在转轴上,要注意同心度的保证。在测试时,每转动 1° 进行一次校准,实时记录原始信号经过校准和未经过校准的解算角度值以及转台标准角度值即理论角度值,分析误差。图11为测试时传感器和高精度时栅转台系统实物图。

分别记录经过校准和未经过校准的角度值,以高精度时栅的输出角度为基准,图12为信号校准前后角度误

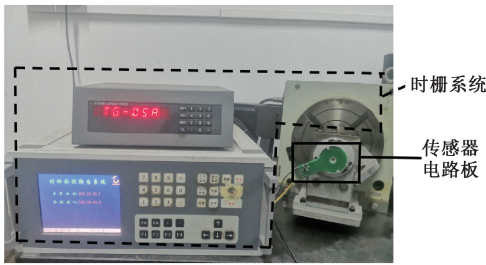


图 11 传感器和高精度时栅转台系统实物图

Fig. 11 Physical image of sensor and high-precision time grid turntable system

差分析图,从图可以看出,在经过校准后,传感器的测量精度达到了 0.1° ,与未校准时的 0.58° 相比,降低了很多,达到了较好的测量结果,相比于相关领域的传感器具有一定的优势。

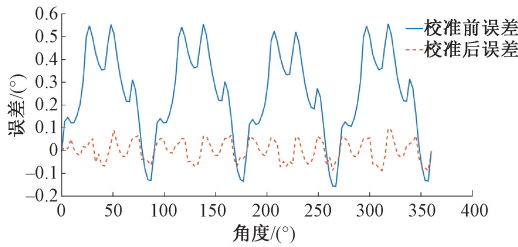


图 12 信号校准前后角度误差对比

Fig. 12 Angle error comparison before and after signal calibration

图 13 和 14 为解算角度与理论角度的拟合曲线及残差图,从图中两者的关系式可以看出,解算角度约等于理论角度,说明解算角度与理论角度之间有良好的线性关系,因此该传感器测量精度达到了预期的效果。

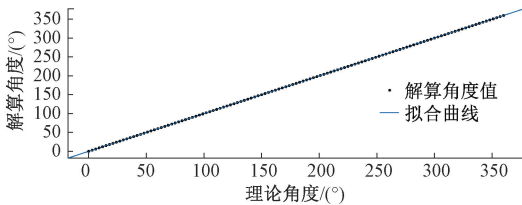


图 13 解算角度与理论角度拟合曲线图

Fig. 13 Fitting curve diagram of solution angle and theoretical angle

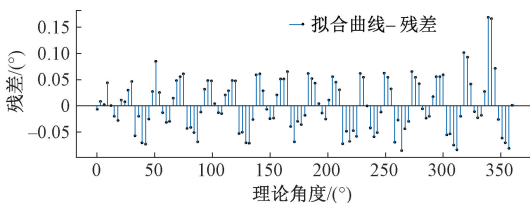


图 14 拟合残差图

Fig. 14 Fitted residuals plot

6 结 论

本文研究和设计了一种基于电感式的角位移传感器,结构包括转子,激励线圈,接收线圈以及后续处理电路,本文叙述了传感器测量机理,线圈结构设计,校准算法编写以及实验测量,经过实验测量,不仅验证了本方案的可行性,而且结果表明,经过校准,测量精度达到了 0.1° ,相比于一般的电感式传感器优势明显。

此外,在实际测量中发现传感器的误差具有一定的规律,因此随着后期的深入研究,通过改进传感器的机械结构以及装配工艺,可以消除其误差中的规律成分,从而进一步提高测量精度。

本传感器的缺点在于在掉电后无法记忆位置,为了同时兼顾测量精度和绝对位置,在本文中线圈的内测或外侧额外增加一组线圈,增加的线圈用来粗测转动的位置,本文中线圈用来精测转动位置,两者结合可以实现掉电绝对位置的测量。

参考文献

[1] W J F. Overview of automotive sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 296-308.

[2] TREUTLER C. Magnetic sensors for automotive applications[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2001, 91(1):1-7.

[3] JOHN G W, HALIT E. Measurement, instrumentation, and sensors handbook:Two-volume set[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.

[4] ZHENG D, ZHANG S, SHUAI W, et al. A capacitive rotary encoder based on quadrature modulation and demodulation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(1): 143-153.

[5] ANANDAN N, GEORGE B. A wide-range capacitive sensor for linear and angular displacement measurement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5728-5737.

[6] 徐英,张涛,李敏雪,等. 电容式角位移传感器电场有限元仿真研究 [J]. 仪器仪表学报, 2004 (4): 512-515.

XU Y, ZHANG T, LI M X, et al. Electric field finite element simulation for capacitive angular sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004 (4): 512-515.

[7] 张宇鹏,徐钰蕾,王昱棠. 高精度电容式角位移传感器测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (S1): 147-150.

ZHANG Y P, XU Y L, WANG Y T. Measurement method of high-precision capacitive angular displacement

- sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S1): 147-150.
- [8] WANG L, MEYDAN T, WJIFAMS P, et al. A proposed optical-based sensor for assessment of hand movement[J]. 2015: 1-4.
- [9] DAS S, CHAKRABORTY B. Design and realization of an optical rotary sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2675-2681.
- [10] 高文政,石洪,周浩然,等. 平面磁场式角度传感器的新型信号处理方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(11): 177-183.
- GAO W ZH, SHI H, ZHOU H R, et al. Research on a novel signal processing technique for planar inductive angle sensor [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34 (11): 177-183.
- [11] 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 H, MA Q L, et al. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. China Optical, 2019, 12(4): 741-752.
- [12] ZHANG C, LI Z, CHEN J, et al. Design and research of a novel non-contact vertical inductive torque sensor[J]. Measurement, 2021, 177(2): 312-315.
- [13] 徐汉斌,贾安礼,赵吴广. 电感式角度传感器电磁耦合敏感元件的研究[J]. 机电工程, 2016, 33(8): 1028-1032.
- XU H B, JIA AN L, ZHAO W G. Electromagnetic coupling sensitive element for inductive angle sensor[J]. Electromechanical Engineering, 2016, 33 (8): 1028-1032.
- [14] ZIJIAN Z, FENGLI N, YANGYANG D, et al. A novel absolute angular position sensor based on electromagnetism [J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2013, 194(1): 1-12.
- [15] 陈浩,王立勇,陈涛. 电感式磨粒传感器线圈参数对磁场均匀性影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 10-16.
- CHEN H, WANG L Y, CHEN T. Influence of coil parameters on magnetic field uniformity of inductance abrasive sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 10-16.
- [16] 孙世政,周清松,何泽银. 嵌入式时栅角位移传感器短周期误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 27-34.
- SUN SH ZH, ZHOU Q S, HE Z Y. Short period error analysis and compensation of embedded time grating angular displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 27-34.
- [17] 赵吴广. 电感式非接触角度传感器实现机理及实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- ZHAO W G. Study on the mechanism and experimen of non-contact angle sensor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [18] HRISTOFOROU E, DIMITROPOULOS P D, PETROU J. A new position sensor based on the MDL technique [J]. Sens. Actuators A Phys., 2006(132): 112-121.

作者简介



陈小丽, 2019年于太原师范学院获得学士学位, 现为北京科技大学硕士研究生, 主要研究方向为传感器技术与应用。

E-mail: c15735640397@126.com

Chen Xiaoli received her B. Sc. degree from Taiyuan Normal University in 2019. She is currently a master student at University of Science and Technology Beijing. Her main research interests include sensor technology and application.



李杰(通信作者), 1986年于天津大学获得学士学位, 1991年于天津大学获得硕士学位, 现为北京科技大学副教授, 主要研究方向为传感器技术与应用。

E-mail: jieli@126.com

Li Jie (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Tianjin University in 1986 and 1991, respectively. He is currently an associate professor at University of Science and Technology Beijing. His main research interests include sensor technology and application.