

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.08.022

电感式角度传感器电磁耦合敏感元件的研究

徐汉斌, 贾安礼, 赵吴广

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对传统角度传感器结构复杂、制造成本高,且不易于嵌入式安装等不足,设计研究了一种基于PCB板的平面电感式角度传感器上的电磁耦合敏感元件。分析了此电感式角度传感器的实现机理,根据实现机理,建立了理论模型;在ANSYS Maxwell软件中创建了激励线圈、接收线圈和转子的实体模型,并进行了电磁耦合仿真分析,仿真结果验证了设计的合理性与可行性。根据理论模型制作原型敏感元件,在角度传感器实验台上进行电磁耦合实验,得到转子转动角度与接收信号峰峰值变化的对应关系,分析其影响因素。改进设计,对改进型敏感元件进行电磁耦合实验,实验结果表明改进型敏感元件提高了角度检测的灵敏度,3组接收信号峰峰值变化曲线中间部分线性度良好,且能完整覆盖一个变化周期。

关键词:角度传感器;敏感元件;电磁耦合;印刷电路板

中图分类号:TP212.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)08-1028-05

Electromagnetic coupling sensitive element for inductive angle sensor

XV Han-bin, JIA An-li, ZHAO Wu-guang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the problem of the complicated structure, high production cost and uneasiness for embedded installation of traditional angle sensor, the design studied the electromagnetic coupling sensor of PCB-based inductive angle sensor plane. It analyzed the implementation mechanism of the inductive angle sensor and established the theoretical model based on it. The analysis was conducted on the implementation mechanism to establish the excitation coil, the receiver coil and the rotor with ANSYS Maxwell. Then, electromagnetic coupling simulation and analysis were carried out. The simulation results verified the design was reasonable and feasible. Prototype sensor was produced based on the theoretical model and electromagnetic coupling experiments were carried out on the angle sensor bench. Thereby, the correspondence between the angle of rotation of the rotor and peak-to-peak variation of the receive signals was obtained. Based on it, the influencing factors were analyzed, thus the design can be improved based on it. The electromagnetic coupling experiments of the improved design were carried out on the improved sensors. The experimental results indicate that improved sensors raise the sensitivity of angle detection. The linearity of the middle part of 3 groups of received signal peak-to-peak curve is good, and they can cover a full change circle.

Key words: angle sensor; sensitive element; electromagnetic coupling; print circuit board (PCB)

0 引言

角度传感器是一种常见的角位移检测设备,它将被测物体的角度变化转化为电信号,并被广泛地应用在汽车、自动化工业、机器人、军事工程、航空航天等领

域^[1-2]。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传感器,非接触式角度传感器有电容式、霍尔式、光电式和磁阻式等角度传感器^[3-6]。单从结构上看,接触式角度传感器由于敏感元件相互接触,工作时相互运动,故而敏感元件易磨损,

收稿日期:2016-05-03

作者简介:徐汉斌(1969-),男,湖北武汉人,博士,副教授,主要从事机械电子、嵌入式技术、机械工程测试技术方面的研究. E-mail: 550831924@qq.com

因此接触式角度传感器精度不高,使用寿命短,而非接触式角度传感器避免了上述的缺陷,但由于各种非接触式角度传感器的敏感元件结构复杂,制造成本高,不利于嵌入式安装,部分核心部件还需要国外进口,限制和影响了角度传感器的制造与应用。

本研究的平面非接触电感式角度传感器敏感元件,结合了电涡流传感器、感应同步器和旋转变压器的特点,在一定程度上克服了其他非接触式角度传感器敏感元件的缺点,尤其适用于嵌入式结构设计中,且性价比高^[7-8]。上海交通大学李凌、杨明等人^[9]对该传感器敏感元件做了初步研究,验证了敏感元件设计的合理性与可行性,没有对实验结果做进一步分析,也没对初级模版进行改进。

本研究先对角度传感器的实现机理进行分析,建立敏感元件的理论模型,用 ANSYS Maxwell 软件对敏感元件理论模型进行电磁耦合仿真分析。制作敏感器件的 PCB 板和对应的转子,在角度传感器试验台上进行电磁耦合实验,得到转子转动角度与接收信号峰峰值变化的对应关系,分析其影响因素,改进设计,最终得到一款性能优良的敏感元件。

1 实现机理

本研究介绍的电感式角度传感器敏感元件由激励线圈、接收线圈和转子组成,敏感元件原理图如图 1 所示。

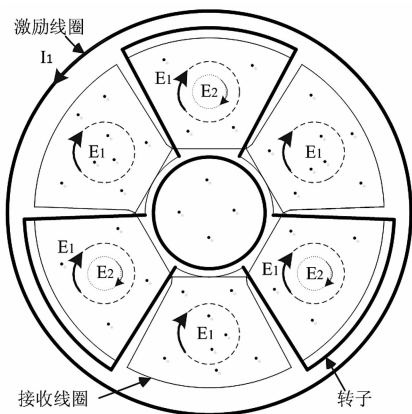


图 1 敏感元件原理图

激励线圈和接收线圈在同一平面内,转子在接收线圈上方。

由传感器电路部分产生正弦信号给激励线圈,激励线圈平面产生交变磁场,理想状态下希望在激励线圈平面内的交变磁场处处相等,但受圆形激励线圈结构限制,交变磁场在激励线圈平面内是中心对称的,该特点决定了接收线圈结构整体是一个中

心对称图形。

转子由不锈钢等导电材质构成,转子在激励线圈产生的交变磁场中会产生涡电流,由楞次定律可知,转子上涡电流激发的新磁场与激励线圈产生的原磁场方向相反。

图 1 中接收线圈由一根导线绕成 6 个串联反接的扇形线圈,转子每瓣正好覆盖一个扇形线圈。当激励电流 I_1 增大时,扇形线圈内产生涡旋电场 E_1 , E_1 的方向是抑制激励线圈产生的磁场增大,符合右手定则。激励电流 I_1 增大时,转子上的涡电流也会增大,涡电流激发的磁场同样增大,在转子下方产生涡旋电场 E_2 , E_2 的方向是抑制转子涡电流产生的新磁场增大。由于涡电流激发的新磁场与激励电流激发的原磁场方向相反,涡旋电场 E_1 与 E_2 的方向相反。接收线圈在涡旋电场力的作用下产生感生电动势,这时在接收线圈输出端可测得感应电压,且感应电压随时间变化,成正弦波形状,频率与激励信号频率相同。

当转子的位置不变时,接收电压峰峰值不变,当转子转动一定角度,接收线圈平面的磁场分布发生改变,接收电压的峰峰值随着改变,通过测量接收线圈感生电动势的峰峰值大小,来确定转子转动的角度。

2 敏感元件设计

2.1 激励线圈模型

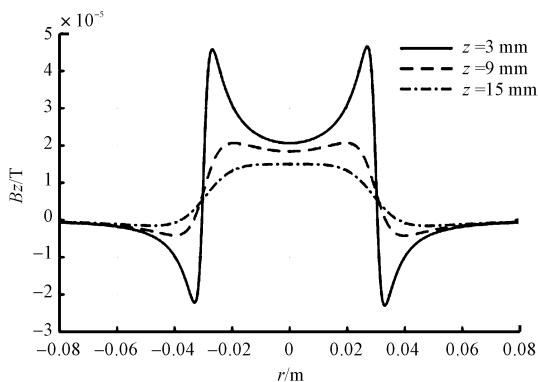
激励线圈负责产生匀强交变磁场,在此角度传感器中,交变磁场只需沿线圈平面中心径向对称。本研究中激励线圈采用平面螺旋线圈。

为了方便计算磁场强度,平面螺旋线圈可近似由多个圆线圈组成。设某单个圆线圈半径为 R ,以线圈的中心点为坐标原点,圆线圈平面为 $X-Y$ 平面建立直角坐标系,则载流线圈附近任一点的磁场可由毕奥—萨法尔定律求出^[10-11]。由于载流圆线圈的磁场以 Z 轴为中心沿着径向对称,则在垂直于 Z 轴的平面上,到 Z 轴距离相等的任意两点在 Z 方向的磁感应强度 B_z 幅值相等。

$$B_z = \frac{\mu_0 i R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(R - r \cos \theta) d\theta}{(r^2 + z^2 + R^2 - 2Rr \cos \theta)^{3/2}} \quad (1)$$

式中: μ_0 —真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; i —载流线圈半径; r —到 Z 轴的距离; z —一点在空间的 Z 轴坐标。

根据公式(1)可得到载流线圈周边 B_z 磁场的大小。设线圈半径 R 为 0.03 m,电流 i 为 1 A,圆线圈上方半径为 r 的圆面上磁场强度 B_z 分布如图 2 所示。

图2 圆线圈上方 B_z 分布图

从图2可以看出,距离激励线圈越远的平面,线圈正上方的 B_z 幅值越小;距离激励线圈越近的平面,线圈正上方的 B_z 幅值越大;靠近激励线圈的平面,激励线圈导线正上方的幅值比中间高,幅值总体沿 Z 轴径向对称分布。

2.2 接收线圈模型

接收线圈应在单独激励磁场中不产生感应电动势,而在激励线圈与转子耦合磁场中产生与转子位置相对应的感应电动势,接收线圈模型需遵循以下原则:

接收线圈由一根导线绕成多个不相交的串联反接的绕组。如果导线相交使某瓣绕组产生闭合回路,则此瓣绕组产生的感应电动势将不会对总体感应电动势产生影响,即反映不出定子在此处转动变化。

接收线圈绕组必须大小相等,个数为偶数,沿中心轴径向对称且极性交替。接收线圈绕组的布局与交变磁场的分布有关,激励线圈是平面螺旋线圈,产生的交变磁场沿其中心轴径向对称。因此,接收线圈绕组需布置成沿着接收线圈中心径向对称,这样当接收线圈的中心轴与激励线圈的中心轴重合时,接收线圈中每个绕组内磁感应强度幅值和磁场变化将一致。极性交替可使其在激励线圈产生的交变磁场中不产生感应电动势。

2.3 转子模型

转子是传感器中用于与外界相连可绕轴心转动的机构。转子模型设计需要满足以下原则:

转子为表面平整光滑的导电材料构成。在传感器内转子表面与激励线圈平面保持平行,转子受交变磁场影响产生涡流,在转子下方产生与原磁场反相的磁力线,削弱激励线圈产生的磁力线。转子覆盖部分的磁场幅值比转子未覆盖部分的磁场幅值要小,因此出现幅值阶梯。

转子大小与接收线圈绕组大小相近,能覆盖同极性的接收线圈绕组,瓣数应为接收线圈绕组数的一半。当转子完全覆盖接收线圈某一极性绕组时,接收线圈

上的感应电动势峰峰值达到极值。

转子的厚度要大于趋肤深度。趋肤深度 δ 计算公式如下:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_r \mu_0}} \quad (2)$$

式中: ω —角频率; σ —电导率; μ_r —相对磁导率; μ_0 —真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

3 用 ANSYS Maxwell 软件进行仿真

3.1 激励线圈仿真

本研究在 ANSYS Maxwell 3D 软件中绘制螺旋线圈,内径为 13.5 mm,线宽 0.2 mm,线距 0.2 mm,匝数为 5 匝,厚度为 0.04 mm,材质铜。给螺旋线圈加载频率 4 MHz,强度 1 A 的激励电流,使用 Maxwell 3D 模块中的涡流场分析模块进行仿真分析,求得 $z = 1.5$ mm 平面上 Z 轴方向的磁感应强度 B_z 的值导入 Matlab 画出三维图,如图 3 所示。

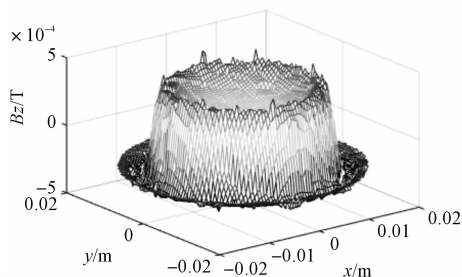


图3 激励线圈仿真图

由图3可看出 Z 轴方向的磁场主要集中在螺旋线圈的正上方,且幅值四周高,中间低,以激励线圈中心径向对称。

3.2 激励线圈、接收线圈与转子仿真

在激励线圈仿真模型基础上,参照图1绘制接收线圈及转子。激励线圈和接收线圈在同一平面,且线圈上表面在 $X-Y$ 平面上,圆心与 Z 轴重合,转子的下表面与 $z = 2$ mm 的平面重合,圆心与 Z 轴重合,加载 1 A 激励电流,仿真得到 $z = 1.5$ mm 平面上磁感应强度 B_z 如图 4 所示。

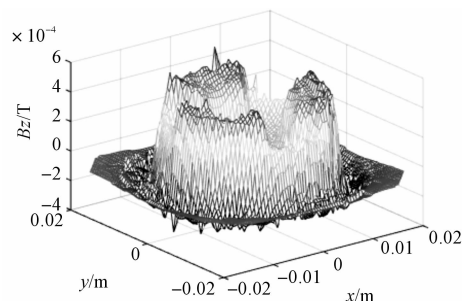


图4 敏感元件电磁耦合仿真图

对比图 3 与图 4,可以看到加入转子后,被转子覆盖部分正下方的磁感应强度 B_z 与没有被转子覆盖部分正下方的磁感应强度 B_z 变化趋势一致,即同时增大或减小,但被转子覆盖部分正下方的磁感应强度 B_z 的幅值总小于没有被转子覆盖部分正下方的磁感应强度 B_z 的幅值,即出现幅值阶梯。仿真结果与理论模型计算结果一致,证明了理论设计的合理性与可行性。

4 电磁耦合实验

4.1 原型敏感元件实验

本研究根据 ANSYS Maxwell 软件中模型的尺寸,用 1o Z 的双层 PCB 板制作激励线圈和接收线圈,用 0.8 mm 厚的不锈钢板制作转子。接收线圈一共有 6 个极性线圈,每相邻的两个极性线圈极性相反,跨度 120°。原型接收线圈及转子如图 5 所示。

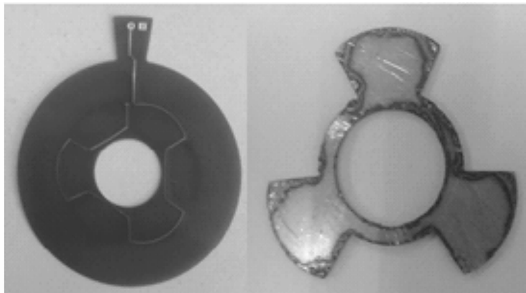


图 5 原型接收线圈及转子

实验中将 3 个接收线圈和 1 个激励线圈顺序叠放,其中 3 个接收线圈依次错开 15° 放置。用泰克 AFG3022B 信号发生器,产生 4 MHz 激励电流。以转子完全覆盖一个极性线圈的位置算起,顺时针方向旋转 120°,每隔 5° 采样一次接收信号的峰值。测试结果如图 6 所示。

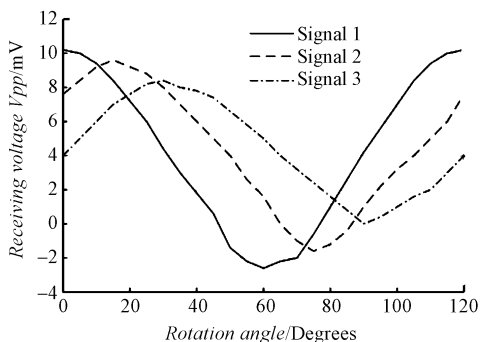


图 6 原型实验峰值图

4.2 数据分析

图 6 中 3 路接收信号峰值都随转子角度变化而呈周期变化,周期为 120°。当转子完全覆盖一个极性绕

组时,接收信号 1 峰值正向最大;当转过 30° 时,此时转子刚好在极性相反的两个绕组之间,理论上极性相反的绕组磁通量一致,不将产生感应电动势,此时接受信号应该为 0,但接收线圈极性相反的绕组不在同一平面上,因此有初始感应电动势,导致接收信号整体上移;当转子转过 60°,即完全覆盖另一个极性绕组时,接受信号峰值出现负向最大。随着转子转到 120° 后,接收信号的峰值又逐渐的增至正相最大,完成一个周期的变化。

图中 3 路信号峰值变化的最大值逐渐减小。由于 3 个接收线圈是顺序叠放,因此接收线圈所在平面不同,越靠近激励线圈,所在平面的感应磁场越强,感应电动势越大,这与图 2 分析吻合。

在峰值图的最大值和最小值处附近的线性度不好,不利于信号幅值与角度位移的标定。因此需要多组线圈信号,各取其中间线性度好的部分完成周期变换。实验中选用 3 组线圈,每组线圈有一个下降沿和一个上升沿,共有 6 段线,接收信号周期为 120°,每段线间隔 20°。因此,原型实验中 3 个接收线圈应依次错开 20° 才能使整个周期具有很好的线性度。

提高接收线圈绕组数和提高转子瓣数,可减小峰值信号变化周期,即提高角度传感器的灵敏度。

4.3 改进型敏感元件实验

由原型实验数据分析可知,接收线圈的布局直接影响到可用信号的完整性及信号灵敏度。因此,本研究在改进版本中将 3 组接收线圈和 1 组激励线圈做到了一块 4 层 PCB 板上,实现激励线圈和接收线圈一体化,如图 7 所示。

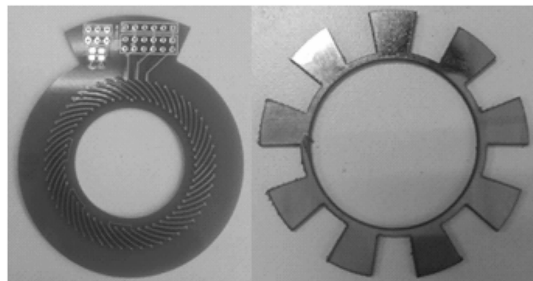


图 7 改进型定子圈及转子

图 7 中定子厚度为 0.8 mm,有 9 个瓣。接收线圈占据 PCB 上表层的 0.2 mm,激励线圈占据 PCB 下表层的 0.2 mm,它们的间距为 0.4 mm。每组接收线圈错开 6.7°。实验中转子顺时针旋转 40°,每隔 2° 采样一次接收信号的峰值,实验结果如图 8 所示。

图 8 中 3 路信号峰值变化大小相同,在各自的周期内对应相等,周期为 40°,峰值相位角相差 6.7°,中

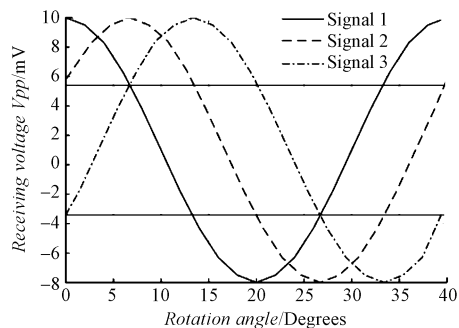


图 8 改进型实验峰峰值图

间 6 段线完整覆盖一个周期的峰值变化,线性度较好。从图 8 中可以看出 3 路信号整体向上有 1 mV 偏移,这属于系统误差,可在后续处理电路中消除。由此,改进型敏感元件符合设计要求。

5 结束语

该电感式角度传感器采用多层 PCB 板制作,造价低,加工方便,且实现定子一体化。在 PCB 板的两个层面上,多组接收线圈依次交错分布,使得在同一平面上每组接收线圈具有相同布线长度。为保证整圈测量的线性度,通常采用 3 组接收线圈设计,每组接收线圈依次错开 A 度 ($A = 60/\text{转子瓣数}$)。转子瓣数越多,在相同激励条件下传感器灵敏度越高,但会受到传感器大小及制作工艺的限制。

本研究仅仅是对角度传感器的敏感元件进行设计研究,一个完整的传感器还需要电路处理部分,要准确地采集到接收信号峰峰值,需要激励信号源与接

收信号采集电路一同设计,采集频率为激励信号频率的 2 倍,同时需要设计延时电路调整采集点相对接收信号的初始相位差。

参考文献 (References):

- [1] 周良杰,赵治国. 方向盘转角传感器误差成因与补偿的研究[J]. 仪表技术与传感器,2013(11):7-10.
- [2] 杨 彩,周艳霞. 方向盘转角传感器研究进展[J]. 传感器与微系统,2007,26(11):1-4.
- [3] 罗东辉. 扫描电机用电容式角度传感器的研究[J]. 微特电机,2015,43(5):47-49.
- [4] 王新峰,许彬彬,戴立业. 一种基于径向充磁的霍尔式新型角度传感器[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2016,55(1):126-130.
- [5] 韦湘宜,丁红昌,曹国华. 光电编码器检测技术的研究现状及发展趋势[J]. 电子科技,2015,28(9):184-188.
- [6] 李 旋. 磁敏角度传感器特性分析[J]. 仪表技术,2015(3):52-54.
- [7] 袁 辉,刘朝晖,李治国,等. 圆感应同步器系统误差的动态提取与补偿[J]. 光学精密工程,2015,23(3):794-802.
- [8] 詹涵菁,付建宁,黄文康. 机械臂角度传感器的电路设计与信号处理[J]. 微特电机,2014,42(7):15-18,28.
- [9] 李 凌,杨 明,叶 林. 感应式非接触角度传感器电磁耦合系统设计[J]. 传感器与微系统,2011,30(10):130-133.
- [10] 詹树军. 载流圆线圈外空间任意一点磁场的研究[J]. 毕节学院学报,2012,30(8):112-120.
- [11] 武中华,李文尧,简 燕. 瞬变电磁法圆形线圈自感计算[J]. 物探化探计算技术,2011,33(6):596-600.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

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.

XV Han-bin, JIA An-li, ZHAO Wu-guang. Electromagnetic coupling sensitive element for inductive angle sensor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(8):1028-1032.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>