

# EPS 用立式扭矩传感器的电磁分析

郭艳玲<sup>1</sup> 常子凡<sup>1,2</sup> 那少昕<sup>1,2</sup>

(1. 东北林业大学机电工程学院机械电子工程系 哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨力盛达机电科技有限公司 哈尔滨 150040)

**摘要:** 扭矩传感器是汽车电动助力转向系统(EPS)中的核心部件,根据电磁感应原理设计了一种新型立体磁电式扭矩传感器,首先介绍了传感器的圆柱式结构及工作原理,然后采用 Ansoft Maxwell 对传感器的电磁感应系统进行建模,通过静态分析,得到在使用电流为 100 mA 时系统磁场分布状态及静态输出电压,并利用瞬态模块模拟传感器工作过程,得到其动态输出信号为幅值随系统相对位置做呈正弦变化的高频感生电压,最后根据输出信号的特点设计了相应加法检波处理的原理电路。

**关键词:** 扭矩传感器;电磁感应;Ansoft Maxwell 仿真;信号处理

**中图分类号:** TP212.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** D460.4020

## Electromagnetic analysis of 3D inductive torque sensor for EPS

Guo Yanling<sup>1</sup> Chang Zifan<sup>1,2</sup> Na Shaodan<sup>1,2</sup>

(1. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Harbin Lishengda Electrical

Technology Co., Ltd., Harbin 150040, China)

**Abstract:** Torque sensor is a core member of automotive electric power steering system (EPS), a new three-dimensional magnetolectric torque sensor based on electromagnetic induction principle is designed. First the cylindrical structure and working principle of the sensor are introduced, then the electromagnetic induction system of sensor is simulated by using Ansoft Maxwell, the magnetic field distribution and quiescent output voltage when current is 100 mA are obtained by static analysis, and by simulating sensors work process with transient modules, it comes to that the dynamic output signal is high frequency induced voltage, whose amplitude sinusoidally changed with the relative position of system. finally the adder detection circuit is designed according to the characteristics of the output signal.

**Keywords:** torque sensor; inductive; simulation of Ansoft Maxwell; signal processing

## 1 引言

EPS 扭矩传感器主要用来检测汽车方向盘扭矩大小和方向<sup>[1]</sup>,并将检测信号传给控制器,以此为依据控制电机转速和方向,以达到助力目的。目前国内外现有 EPS 系统采用非接触式扭矩传感器主要包括应变式、磁弹性式、磁电式和光电式<sup>[2]</sup>。其中磁电式传感器以其具有结构简单,测量精度高,无需额外磁性材料,无需设置温度补偿<sup>[3]</sup>等优点成为传感器研究的主要方向之一。

根据电磁感应原理,通过使用柔性电路板(FPC)技术,提出立式扭矩传感器设计方案,将传统传感器的平面布置形式改为同轴立体圆柱结构,占用空间小,能有效避免内部磁场的干扰,更适合安装在汽车转向系统中,并获得国家实用新型专利(CN201520963725.0)。

由于立体线圈磁场的电磁耦合及齿片转子涡流效应的数学模型十分复杂,本文通过使用电磁场分析软件 Ansoft Maxwell 对所设计的扭矩传感器进行建模仿真,并设计输出信号处理方案,以得到 EPS 控制器所需信号,为后续传感器整体设计提供理论基础。

## 2 结构设计及原理分析

本文所介绍的立式扭矩传感器是由定子和一对齿片转子组成,如图 1 所示。其中定子是在 FPC 上印刷特殊形状的线圈,利用其特有的挠性,制成的立体线圈<sup>[4]</sup>。立体线圈上布置有一个激励线圈及两组接收线圈。激励线圈位于中部,为多匝螺旋线圈;接收线圈组上下分布,每组接收线圈的 3 个单线圈间隔  $6.6^\circ$ ,每个单线圈在圆柱面上形成菱形正反回路各 9 个,每个回路占  $20^\circ$ ,如图 2 所示。齿片转子

位于定子内部,分别固定在输入轴与输出轴上,轴向和接收线圈对应。每个齿片转子由9个均匀分布的齿片组成,每个齿片在空间占据 $20^\circ$ 。

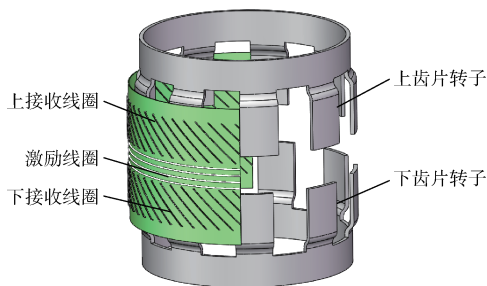


图1 立体磁电式扭矩传感器半剖结构

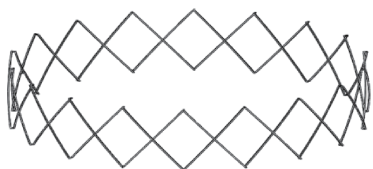


图2 接收线圈绕线样式

根据电磁感应原理,当激励线圈通以高频交流电时,会在空间内产生周向均匀分布的交变磁场,位于这个交变磁场中的接收线圈会产生与原电流频率相同的感应电压,由于接收线圈采用正回路布设,由激励线圈对接收线圈的耦合电压为0。同时处于原交变磁场中转子齿片由涡流作用,削弱了转子覆盖区域的磁场,造成磁场分布的不均衡性<sup>[5]</sup>,这种不均衡性导致接收线圈正回路感生电压不再相等,从而输出耦合电压不再为0。当齿片转子随汽车方向盘输入轴转动一定角度时,转子的齿片对接收线圈正回路覆盖面积发生变化,接收线圈输出电压变化。在一对正回路范围内建立起齿片转子旋转角度 $\Delta\theta$ 与正回路覆盖面积 $A$ 的示意图,如图3所示。假设未覆盖区域磁场强度不变,则接收线圈感应电压幅值 $V$ 与正回路覆盖区域面积 $A$ 成正比,即 $V = RA$ ,其中 $R$ 为耦合强度常量系数。

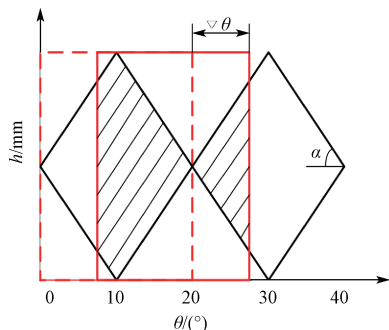


图3 转子齿片覆盖面积示意

建立转子转角与覆盖面积的数学模型

$$\begin{cases} A = S - 2\Delta\theta^2 \tan\alpha & \Delta\theta \in (0, 10) \\ A = 2(20 - \Delta\theta)^2 \tan\alpha - S\Delta\theta & \Delta\theta \in (10, 20) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A$ 为齿片转子覆盖回路面积; $\Delta\theta$ 为齿片转子旋转角度; $S$ 为单个菱形回路面积; $\alpha$ 为菱形回路边线夹角;

将式(1)代入接收线圈感应电压公式可知,当定子线圈与齿片转子参数确定的情况下,在一个回路范围接收线圈输出感生电压 $V$ 为转动角度 $\Delta\theta$ 的二次函数。当转子转过 $20^\circ$ 后,齿片进入下一组回路,输出电压幅值相同方向相反,可知连续函数曲线近似正弦波。

扭杆是ESP转向管柱中的重要部件,扭杆一端通过花键和转向盘的上的输入轴相连,另一端通过径向销和输出轴相连<sup>[6]</sup>。方向盘转动时,分别位于输入轴和输出轴上下转子发生相对旋转,通过测量扭杆旋转的相对角度<sup>[7]</sup>,利用材料力学扭矩与转角的关系计算得到扭杆所受扭矩。

### 3 电磁系统仿真分析

#### 3.1 电磁系统静态仿真

Ansoft Maxwell 是建立在有限元基础适合各种电磁场分析的工具,采用实体造型和人机对话的形式实现磁场分析计算<sup>[8-9]</sup>。由于 Ansoft Maxwell 软件在复杂实体和曲面模型上的处理效率较低,本文中利用 SolidWorks 三维软件对所设计传感器电磁系统进行三维建模,并导入 Maxwell 中进行网格剖分<sup>[10]</sup>。因为本传感器采用上下对称结构,为简化分析过程,保留模型上半部分进行分析,且将激励线圈设置为外径30 mm,壁厚0.5 mm,截面为矩形的环形导体,线圈匝数为10。由于3个接收线圈电磁特性相互独立,模型中只保留一个接收线圈。传感器剖分模型如图4所示。

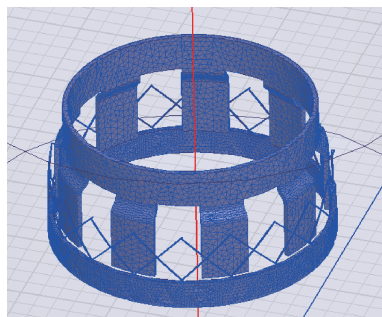


图4 三维模型及网格剖分结果

本文所设计的立体磁电式扭矩传感器主要利用的是齿片转子在高频磁场环境下的涡流效应,因此在确定了传感器电磁系统模型后对其进行三维涡流场仿真。已知单匝激励线圈输入电流为100 mA,则模型输入总电流为1 000 mA,频率为4 MHz。

在没有转子的情况下,线圈曲面磁场分布如图5所示。由图可知,激励线圈产生的磁场周向均匀分布,测得此时接收线圈感生高频电压为 $75 \mu\text{V}$ 。这是由于网格划分等因素

影响,在误差允许分为内,输出电压近似为 0,仿真值和理论值一致,说明仿真结果可信。

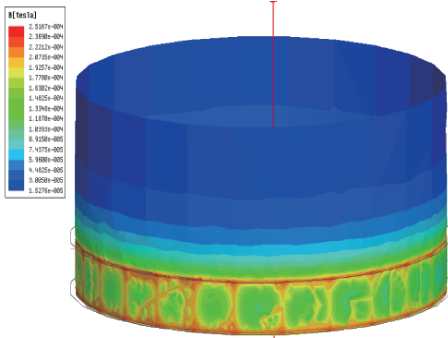


图 5 无转子时圆周曲面磁场云图

图 6 为仿真系统中加入齿片转子且齿片位置和接收线圈正回路对应时,线圈曲面磁场分布云图,可以看出加入转子后,由于电涡流的作用,齿片对应位置的磁场强度被明显削弱。

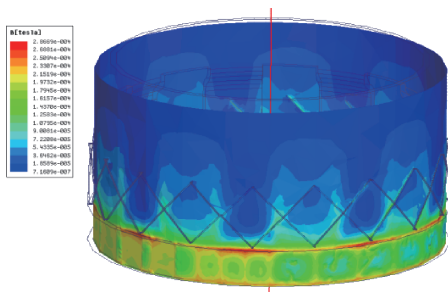


图 6 加入齿片转子后的圆周曲面磁场云图

此时,通过瞬态场分析接收线圈感生电压如图 7 所示,由仿真结果可知,齿片转子涡流效应导致正反回路感生电压不再相等,接收线圈输出感应电压幅值为 50 mV,且感应电压频率与原电压频率相同。

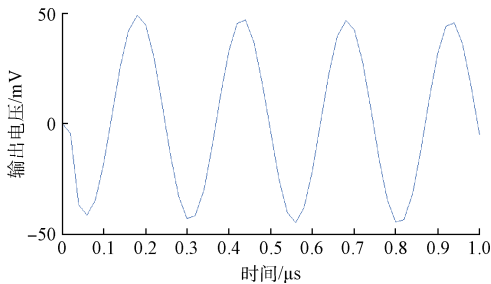


图 7 齿片转子与接收线圈正回路重合时的输出电压

### 3.2 激励线圈电感分析

齿片转子的涡流效应受空间磁场分布及稳定性的影响,与激励线圈电感值密切相关<sup>[11]</sup>。在没有转子的情况下,激励线圈电感为一定值。当引入转子齿片后,激励线圈

电感值受到转子导体涡流效应的影响发生变化。通过对多种不同参数线圈电感值进行有限元仿真<sup>[12]</sup>,分析激励线圈电感值随齿片转子尺寸变化的情况。设计激励线圈内圆直径为 30 mm,由表 1 可知,当选定转子片厚度一定(设计为 0.5 mm),材料为铝的情况下,通入电流频率为 4 MHz,激励线圈其电感值随着转子齿片外圆直径增大而减小。由于受安装传感器的汽车转向管柱尺寸限制,本文设计转子齿片的外圆直径为 29 mm,即与激励线圈径向间隙为 0.5 mm,此时激励线圈电感值为 4.832  $\mu\text{H}$ ,并以此设计外部 LC 正弦振荡电路。

表 1 激励线圈电感随转子直径的变化

齿片转子外圆直径/mm	激励线圈电感/ $\mu\text{H}$	频率=4 MHz
19	5.254	
21	5.204	
23	5.142	
25	5.070	
27	4.969	
29	4.832	

### 3.3 电磁系统瞬态分析

Ansoft Maxwell 瞬态模块能同时求解磁场,电路以及运动等强耦合的方程<sup>[13]</sup>。利用三维瞬态模块对传感器电磁系统进行动态仿真。

在瞬态场中,对齿片转子施加旋转驱动,转动速度设为常量,使用外加电路,由于电脑设备限制,为了输出较为直观的波形,因此设定齿片转子的转动转速为 3 700 rpm,设定仿真时间为转子齿片在此转速下的旋转过一个回路区间( $40^\circ$ )的时间,即 stop time=6  $\mu\text{s}$ ,输出仿真结果如图 8 所示,接收线圈输出电压为高频感应电压,频率为 4 MHz,幅值随齿片转子与线圈回路相对位置变化做呈正弦变化。而齿片转子匀速转动,即齿片转子随时间做一定规则的运动,因此,可得所求输出电压是转速与时间的函数。

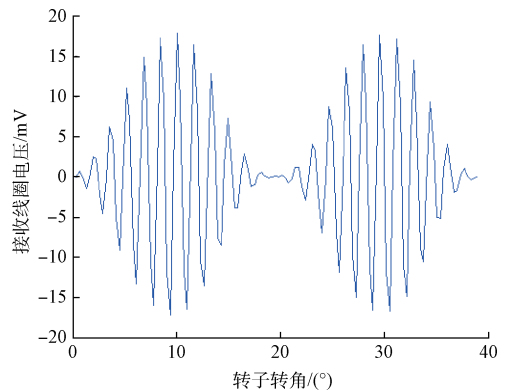


图 8 当齿片转子转动时的接收线圈输出电压

## 4 信号处理

由上述仿真结果可知,在转子匀速转动的情况下,电磁耦合系统输出电压信号相当于以高频感生电压信号作为载波信号对接收线圈上的电压幅值信号进行调制并输出。设计传感器处理电路对电磁耦合电压信号进行检波放大,得到可被EPS控制器利用的信号。

扭矩传感器的电路原理如图9所示。扭矩测量电路是由两组角度测量电路组成,每组角度测量电路3个接收线圈的布置相互独立,因此可以得到6个波形完全一致,彼此有一定相位差的感生电压幅值信号。由于接收线圈上的感应电压和激励线圈的感应电压频率相同,使用加法电路将电磁仿真信号和LC震荡电路信号叠加,保证信号不偏移的情况下将接收线圈的信号进行适当放大<sup>[14]</sup>,输出信号通过由MCU控制的信号选择器选择需要处理的信号后通过峰值检波电路输出包络形状进行检波处理,整流后滤除高频成分<sup>[15]</sup>,得到正弦波电压信号,并根据所选单片机AD采集要求,将信号放大到合适范围。放大后的信号通过模数转换由MCU根据相应算法处理运算。

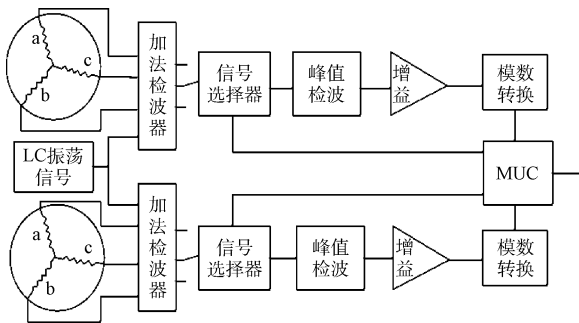


图9 扭矩传感器电路原理框图

## 5 结论

本文提出了立体磁电式扭矩传感器的概念,设计了FPC线路布置形式及整体结构,仿真分析得到接收线圈静态感生电压值及激励线圈作为外部电路电感的具体参数,并针对动态输出信号设计处理电路的检测原理,为后期深入研究和实际应用提供了理论依据。

## 参考文献

- [1] 李志鹏,方玉良,杨凤英,等. 电动助力转向系统扭矩传感器研究现状与发展趋势[J]. 传感器与微系统, 2013(8):11-13,21.
- [2] 宋春华,徐光卫. 扭矩传感器的发展研究综述[J]. 微特电机, 2012(11):58-60.

- [3] 石延平,陈季萍,周庆贵. 一种新型磁电感应式动态非接触扭矩传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2010(5):3-6.
- [4] 李志鹏,常子凡,那少聃. 立式非接触磁电感应扭矩传感器[P]. 黑龙江:CN201520963725.0, 2016-02-29.
- [5] 张晓燕,季学武. 电磁感应式转向盘转速传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2009,30(12):2551-2556.
- [6] 包寿红,罗嗣周. 非接触式扭矩传感器在EPS中的应用[J]. 汽车电器, 2010(6):11-15.
- [7] 王登泉,杨明,叶林,等. 非接触式旋转轴扭矩测量现状[J]. 电子测量技术, 2010,24(6):8-12.
- [8] 李卫国,芦竹茂,叶高生. 基于ANSOFT的含气隙铁心线圈电感分析[J]. 电气开关, 2011(5):80-82.
- [9] 吴畏,聂鲁燕,马利民,等. Ansoft Maxwell电磁场分析在短路匝传感器输出特性中的应用[J]. 传感器与微系统, 2011(6):131-134.
- [10] 方玉良. 用于EPS的电磁感应式扭矩传感器研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2014.
- [11] 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(10):130-132, 140.
- [12] 邵英秋,宋克非. 宽频带感应式磁传感器线圈电感的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(7):703-709.
- [13] 汝晓艳. 基于Ansoft的直线永磁电机瞬态磁场分析[J]. 湖南农机, 2013(9):124-125,130.
- [14] 郑伟. 基于主从处理器的脉冲信号检测系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014,37(11):33-37.
- [15] 黄万伟. 微弱阵列感应信号检测方法研究及其实现[D]. 郑州:中国人民解放军信息工程大学, 2005.

## 作者简介

**郭艳玲**, 1962年生,哈尔滨,教授,博士生导师,美国密歇根大学研修,主要从事机电一体化,特种加工技术的研究。

E-mail:Guo. yl@hotmail. com

**常子凡**,全日制硕士研究生在读,主要研究方向为传感器应用技术。

E-mail:zifanC@163. com

**那少聃**,全日制博士研究生在读,主要研究方向为电机控制、汽车电子。

E-mail:619028079@qq. com