

基于铁基纳米晶合金的非接触扭矩传感器*

陈绍鹏^{1,2}, 李旭珂³, 常英丽^{1,2}, 张颖^{1,2}, 杨立权^{1,2}

(1.平顶山学院 电气与机械工程学院, 河南平顶山 467000;
2.平顶山市精密制造工程技术研究中心, 河南平顶山 467000;
3.平顶山学院 数学与统计学院, 河南平顶山 467000)

摘要: 提出一种基于铁基纳米晶合金的非接触式扭矩传感器。为了达到非接触和受转轴振动影响小的目的, 采用多磁极、环形结构, 利用铁基纳米晶合金的逆磁致伸缩效应来制作传感器。通过试验确定了传感器的各项参数, 验证了转轴振动对输出的影响。试验结果表明, 灵敏度为 2.692 mV/V, 非线性误差为 0.13%, 最大重复性误差为 0.223%, 迟滞误差为 0.26%, 精度为 0.473%; 转轴振动对传感器输出的影响不大。

关键词: 扭矩传感器; 铁基纳米晶; 非接触; 逆磁致伸缩效应; 环形

中图分类号: TP212 文献标识码: A DOI 编码: 10.14016/j.cnki.1001-9227.2020.04.039

Non-contact torque sensor based on fe-based nanocrystalline alloy

CHEN Shaopeng^{1,2}, LI Xuke³, CHANG Yingli^{1,2}, ZHANG Ying^{1,2}, YANG Liqun^{1,2}

(1. Pingdingshan University and Mechanical Engineering, Pingdingshan Henan 467000, China;
2. Precision Manufacturing Engineering Research Center, Pingdingshan Henan 467000, China;
3. Pingdingshan University, Pingdingshan Henan 467000, China)

Abstract: A kind of non-contact torque sensor based on Fe-based nanocrystalline alloy is researched in this paper. In order to achieve the purpose of non-contact and less affected by rotating shaft vibration, multi-pole and circular structure is adopted. The sensor is made based on the principle of inverse magnetostrictive effect of Fe-based nanocrystalline alloys. The sensor parameters are determined and the influence of shaft vibration on sensor output is verified by experimenting. The experiment shows that the sensitivity is 2.692 mV/V, non-linear error is 0.13%, maximum repeatability error is 0.223%, hysteresis error is 0.26%, and accuracy is 0.573%. Rotary shaft vibration has little effect on output.

Key words: torque sensor; fe-based nanocrystalline alloy; non-contact; inverse magnetostrictive effect; ring type

0 引言

与接触式扭矩测量法相比,非接触式测量扭矩具有很大优势,比如寿命长、对工作环境要求不高等^[1]。近年来,国内外学者对扭矩传感器进行了大量研究^[2-4],然而对振动的影响研究甚少。而在非接触测量中,转轴的振动会对测量结果造成很大影响,因此,如何实现在非接触条件下准确地测量是扭矩传感器的一个研究方向。利用逆磁致伸缩效应,不但能够实现非接触,而且往往成本低,具有较强的抗干扰能力^[5-6]。但传统铁磁材料的机电耦合系数很低,导致其能量转换效率不够高,所以应用较难。与传统铁磁材料相比,铁基纳米晶合金的机电耦合系数在其3倍以上^[7-8]。另外,由于铁基纳米

晶材料还具有高磁导率、高饱和磁感应强度和高的磁致伸缩系数^[9-11]等众多优点,在扭矩测量上具有很大的应用前景。采用环形、多对磁极的结构,由于结构对称,可以大大降低转轴振动带来的影响,可以用于高速精密测量。基于此,选取铁基纳米晶磁环作为敏感材料,采用环形、多对磁极结构,对基于铁基纳米晶合金的非接触扭矩传感器进行研究。

1 传感器的结构和测量原理

传感器结构如图1所示。传感器整体结构为环形^[12],转轴外层为铁基纳米晶磁环,磁环形状为半圆,两个组合成环形;磁环外为E型磁芯,磁芯安装在环形支撑架上,可沿半径方向滑动;环形支撑架为半环型,两个组合为环形。共16个E型磁芯,2个一组共8组磁极均匀分布在转轴周围,每个磁芯距离转轴的间隙 δ 均相等。两侧测量极上线圈匝数30,中间励磁极匝数90。磁芯的空间分布如图1所示,将与轴线方向成+45°的磁芯称为A,-45°的称为B,为了使输出加倍,在接线时采用反接的方式,将A与B上的线圈反向串联。

收稿日期: 2019-04-25

* 基金项目: 国家自然科学基金(No.51805284); 河南省高等学校重点科研项目(No.18B460013,19A460006); 平顶山学院青年基金(No.PXY-QNJJ-202003,PXY-QNJJ-2019002)

作者简介: 陈绍鹏(1990-),男,河南许昌人,工学硕士,助教,主要研究方向为传感器。

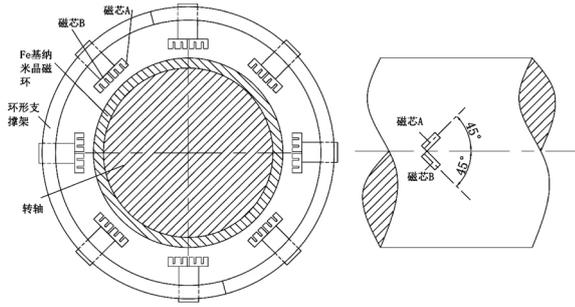


图1 传感器结构

铁基纳米晶磁环厚度为 10 mm,居里温度 570°,饱和磁感应强度 1.25 T,20 kHz 下导磁率大于 50 000,矫顽力 1.6 A/m。磁环与转轴之间无间隙,采用粘贴法,利用改性环氧树脂胶将磁环粘贴在转轴上。改性环氧树脂胶水粘贴强度高,胶层薄,固化后收缩率小,是理想的粘贴用胶水,固化后较为接近刚体状态。E 型磁芯采用 PC44 材质,居里温度 280°,饱和磁感应强度 500,矫顽力 100 A/m,长度 13.4±0.3 mm,宽度 5.8±0.2 mm,有效截面积 15.27 mm²,有效磁路长度 32.01 mm。

E 型磁芯的测量原理^[13]如图 2 所示。磁回路如图 2 中箭头方向所示。转轴外面套着纳米晶磁环,所以此处的被测材料为铁基纳米晶磁环。当轴受扭矩作用时,沿着转轴表面±45°方向,材料磁导率一增一减,磁芯 A 和 B 的测量线圈中出现一正一负,大小相等的电信号,所以输出加倍。

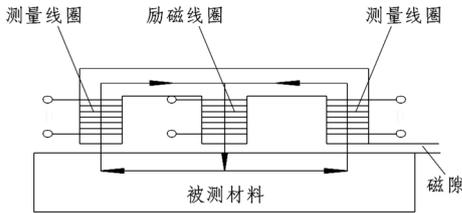


图2 磁测原理

2 传感器的磁路分析

图 3 为 E 型磁芯中的磁路示意图。

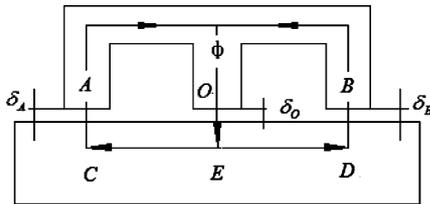


图3 磁路示意图

由公式得:

$$\Phi = \frac{e_1}{r_A + r_B + r_0 + R_{EC} + R_{ED} + R_{OB} + R_{OA}} \quad (1)$$

式中 e_1 为磁动势; r_A 、 r_B 、 r_0 分别为对应磁极下气隙; R_{EC} 、 R_{ED} 、 R_{OB} 、 R_{OA} 分别为相应段的磁阻。

$$r_A = \frac{\delta_A}{\mu_0 S_{MA}} \quad r_B = \frac{\delta_B}{\mu_0 S_{MB}} \quad r_0 = \frac{\delta_0}{\mu_0 S_{MO}} \quad \delta_A = \delta_B = \delta_0$$

$$S_{MA} = S_{MB} = \frac{1}{2} S_{MO} \quad r_A + r_B + r_0 = 5r_0$$

$$R_{EC} + R_{ED} = R_{CD} = \frac{l_{CD}}{\mu_{CD} ha} \quad R_{OA} + R_{OB} = R_M = \sum \frac{1}{\mu M} \left(\frac{l_{Mi}}{S_{Mi}} \right)$$

式中 μ_0 为空气磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; δ_A 、 δ_B 、 δ_0 分别为相应磁极下的气隙; S_{MA} 、 S_{MB} 、 S_{MO} 为相应磁极在转轴上的投影面积; l_{CD} 为两测量极在转轴上的投影长度; a 为铁基纳米晶磁环中磁路平均宽度; h 为磁通渗透磁环的深度; μ_{CD} 为铁基纳米晶磁环的磁导率; R_M 为磁芯的总磁阻; μ_M 为磁芯的绝对磁导率; S_{Mi} 为磁芯各段的截面积; l_{Mi} 为各段的磁路长度。

则式 (1) 可化为:

$$\Phi = \frac{e_1}{5r_0 + R_M + R_{CD}} = \frac{e_1}{\frac{5\delta_0}{\mu_0 S_{MO}} + \sum \frac{1}{\mu M} \left(\frac{l_{Mi}}{S_{Mi}} \right) + \frac{l_{CD}}{\mu_{CD} ha}} \quad (2)$$

$$\text{令 } A = \frac{5}{\mu_0 S_{MO}} \quad B = \frac{l_{CD}}{ha} \quad C = \sum \frac{1}{\mu M} \left(\frac{l_{Mi}}{S_{Mi}} \right)$$

而 $e_1 = i_1 N_1 = \sqrt{2} N_1 I_1 \sin 2\pi ft$

式中 N_1 为励磁线圈的匝数; I_1 为励磁线圈中的电流的有效数值; f 为励磁交流电频率。

则式 (2) 可写为:

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} I_1 N_1 \sin 2\pi ft}{A\delta_0 + \frac{B}{\mu_{CD}} + C} \quad (3)$$

可见气隙的大小对磁通量的影响很大。

3 传感器的输出分析

假设磁芯 A 和 B 上产生的感应电动势为 E_A 和 E_B 。

则感应电动势为:

$$E = 2\pi f N \Phi_m \quad (4)$$

$$\Phi_m = \mu_0 S_0 H_0 = \mu_m S_m H_m = \mu_c S_c H_c$$

式中 f 为励磁频率; N 为测量线圈的匝数; Φ_m 为最大主磁通; μ_0 、 μ_c 、 μ_m 分别为空气、纳米晶合金以及探头磁芯的绝对磁导率; H_0 、 H_c 、 H_m 分别为相应的各段磁路的磁场强度; S_0 、 S_c 、 S_m 分别为相应各段磁路截面积。

实验过程中气隙 δ 不变,则

$$E = 2\pi f N \Phi_m = 2\pi f N \mu_c S_c H_c = k\mu_c \quad (5)$$

式中 $k = 2\pi f N S_c H_c$ 为常量。

两线圈中感应电动势为:

$$\begin{cases} E_A = k\mu_{cA} \\ E_B = k\mu_{cB} \end{cases} \quad (6)$$

式中 μ_{cA} 、 μ_{cB} 分别为磁极 A、B 对应磁环的磁导率。

两测量线圈输出电压为:

$$\begin{cases} U_{0A} = k(\mu_c + \Delta\mu_c) \\ U_{0B} = k(\mu_c - \Delta\mu_c) \end{cases} \quad (7)$$

本试验磁芯数量为 8 组,所以传感器的输出为:

$$U_0 = 8(U_{0A} - U_{0B}) = 16k\Delta\mu_c \quad (8)$$

根据材料的压磁效应:

$$\Delta\mu_c = K_\mu \sigma \quad (9)$$

式中 K_μ 为铁基纳米晶合金的压磁灵敏系数。

根据材料力学:

$$\sigma = \frac{M}{W_p} \quad (10)$$

式中, M 为转轴扭矩, W_p 为转轴抗扭截面系数。
则传感器输出为:

$$U_0 = 16kK_\mu \frac{M}{W_p} \quad (11)$$

由上式能够得出结论, 输出电压与轴上的扭矩成线性关系, 且与磁芯数量成正比。

4 标定试验

励磁电压、励磁频率和气隙大小对传感器的特性有很大的影响^[14], 通过试验确定励磁电压 $U = 1 \text{ V}$, 励磁频率 $f = 10 \text{ kHz}$, 气隙为 0.3 mm 。数据如表 1 所示。

表 1 实验数据

加/卸载次序	加载扭矩/Nm					
	50	100	150	200	250	
	测量数据/mV					
1	加	0.461	1.022	1.574	2.135	2.689
	卸	0.455	1.018	1.574	2.136	2.689
2	加	0.458	1.021	1.578	2.136	2.691
	卸	0.455	1.019	1.572	2.134	2.691
3	加	0.462	1.019	1.575	2.131	2.695
	卸	0.460	1.022	1.573	2.136	2.695

选取表 1 中 3 次加/卸载试验误差较大的一组数据绘制扭矩与输出电压的拟合图如图 4 所示。

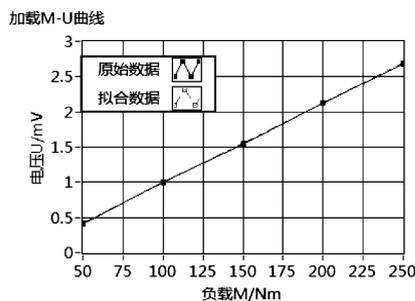


图 4 输出特性曲线与拟合曲线

桥压 1 V , 满量程 $250 \text{ N} \cdot \text{m}$, 灵敏度为 2.692 mV/V 。经分析, 拟合值与测量值之间最大差值 ΔL_{\max} 为 0.0035 ; 对应多次同输入, 不同输出值的最大差值 ΔR_{\max} 为 0.006 ; 相同测量点的加、卸载最大差值 ΔH_{\max} 为 0.007 , 则:

非线性误差为:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.0035}{2.691} \times 100\% = 0.13\%$$

最大重复性误差为

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.006}{2.693} \times 100\% = 0.223\%$$

迟滞误差为

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.007}{2.695} \times 100\% = 0.26\%$$

传感器精度为

$$\gamma = \gamma_L + \sqrt{\gamma_H^2 + \gamma_R^2} = 0.13\% + \sqrt{(0.223\%)^2 + (0.26\%)^2} =$$

0.473%

即最大非线性误差 0.13% , 最大重复性误差 0.223% , 迟滞误差 0.26% , 精度为 0.473% 。

满足一般工业测量的要求, 但是精度仍不够高。经分析, 影响传感器综合精度的因素主要为:

(1) 易受外部磁场干扰。可以采用磁屏蔽措施;

(2) E 型磁芯各部分与转轴之间间隙不均匀。在推导公式 (3) 时, 将 δ_A 、 δ_B 和 δ_O 三者相等, 即励磁极和测量极与转轴间的间隙相等, 实际情况三者不相等。在实际测量中, 三者相差越大, 测量误差越大, 因此, 这是误差的主要来源。可使用尺寸小的磁芯来缩小此影响;

(3) 8 对磁极与转轴间的间隙不完全一致。调整磁极与转轴之间间隙的方法是将厚度一定的垫片放置在磁芯与转轴间, 将磁芯紧压在垫片上, 然后固定磁芯, 最后将垫片抽出。而且分 8 次分别调整 8 对磁芯与转轴的间隙。造成 8 对磁芯与转轴的间隙不完全一致。可改进结构, 将 8 对磁极一起调整;

(4) 励磁匝数和测量匝数。本试验所选取的磁力匝数和测量匝数并非理论计算所得, 理论计算所得匝数较多, 由于磁芯尺寸较小, 绕线较为困难。为方便缠绕线圈, 将匝数进行了缩小;

(5) 气隙大小。文中所选用的气隙大小是多次试验的结果, 但是试验时, 气隙的划分并不细致, 导致所选不一定为最优;

(6) 粘贴法。磁环与转轴之间最为理想的状态是刚体状态, 但不易做到。本试验采用粘贴法, 虽然改性环氧树脂胶性能优异, 但仍达不到刚体状态, 造成扭矩从转轴到磁环的传递效果达不到最优。

5 转速试验

在工程测量中, 转轴振动带来的误差很大。为了研究转轴振动对传感器的影响, 对传感器进行转速试验。试验条件为励磁电压 $U = 1 \text{ V}$, 励磁频率 $f = 10 \text{ kHz}$, 气隙为 0.3 mm , 扭矩 250 N , 分别记录转速为 500 r/min 、 1500 r/min 和 3000 r/min 时传感器的输出数据并绘制曲线。数据较多, 不再赘述, 绘制曲线图 5 所示。

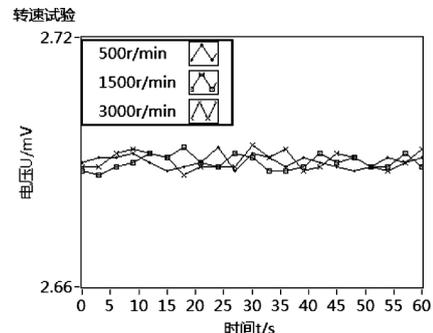


图 5 传感器在不同转速下的输出

通过图 5 可以看出转速为 3000 r/min 时, 传感器的输出波动最大, 转速为 1500 r/min 时次之, 转速为 500 r/min 时最小, 即随着转轴振动的增强, 传感器输出波动量也随之增大。经分析, 转速为 500 r/min 、 1500 r/min 和 3000 r/min 时, 传感器输出的最大波动分

别为 0.214%、0.223% 和 0.231% ,表明多磁极对称分布的结构在处理转轴振动方面具有很大优势。

6 结语

为了减小转轴振动的影响和非接触测量的目的 ,设计了一种采用多磁极对称、环形结构 ,将铁基纳米晶合金作为敏感材料 ,利用其逆磁致伸缩效应来进行测量。通过扭矩试验和转速试验 ,确定了传感器的各项参数 ,验证了转轴振动对传感器输出的影响。通过分析可得出结论:

(1) 传感器结构简单、成本低 ,差动结构可显著提高传感器的输出^[15-16];

(2) 受外部温度影响小 ,温度会影响铁基纳米晶材料的磁导率 ,但只有达到其居里温度时才会产生显著变化 ,传感器工作温度远远小于其居里温度 ,其磁导率可认为恒定不变;

(3) 受轴振动的影响小。磁极均匀分布 ,可以在一定程度上抵消由于转轴在转动过程中振动带来的误差;

(4) 受磁芯尺寸和磁隙的不均匀性影响大 ,随后工作将重点解决此问题。

参考文献

[1] 于彤.传感器原理及应用[M].北京:机械工业出版社,2015,11.
 [2] 喻洪麟,陈薇,何安国.基于环形阵列扭矩传感器的高精度扭矩测量系统设计[J].传感器与微系统,2013,32(7):97-100.
 [3] 石延平,范书华,臧勇,等.汽车 ESP 和 EPS 系统的转角转矩组合式传感器[J].仪表技术与传感器,2012,(10):4-6.

[4] GNAUERT J ,JACOBS G ,KOCK S ,et al.Measurement uncertainty estimation of a novel torque transducer for wind turbine test benches [J].Journal of Physics Conference Series,2018,1065.
 [5] 宋春华,徐光卫.扭矩传感器的发展研究综述[J].微特电机,2012,40(11):58-60.
 [6] 吕华溢,杨军,宋娜.轴系扭矩测量方法与发展趋势[J].计测技术,2017,(2):6-10.
 [7] 王亚峰,宋晓辉.新型传感器技术及应用[M].北京:中国计量出版社,2009.
 [8] 余永华,董俊威.逆磁致伸缩扭矩传感器特性分析[J].武汉理工大学学报,2017,39(1):68-72.
 [9] 朱凤霞,易健宏,李丽娅,等.铁基纳米晶软磁合金的研究现状[J].磁性材料及器件,2008,(2):1-3.
 [10] 于忠卡,张正,李维火,等.FeSiBPCu 系非晶纳米晶合金的制备及软磁性能的研究[J].化工时刊,2018,32(07):5-9.
 [11] 惠希东,吕旷,斯佳佳,等.高饱和磁化强度铁基非晶纳米晶软磁合金发展概况[J].工程科学学报,2018,40(10).
 [12] 陈绍鹏.基于非晶态合金压磁效应的全套环式扭矩传感器的研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
 [13] 石延平,周庆贵,陈季萍.基于非晶态合金压磁效应的磁电感应式非接触动态转矩测量法[J].机械强度,2011,33(4):522-524.
 [14] 唐桂青,郭迎福.压磁式非接触测力传感器检测气隙范围的研究[J].电子测量技术,2013,(2):104-107.
 [15] 赵浩.差动感应式扭矩传感器及其有限元分析[J].传感技术学报,2015,(5):654-659.
 [16] 赵浩.一种自补偿差动式扭矩传感器的研究[J].计量学报,2016,(4):394-397.

(上接第 38 页)

[10] 李玉学,杨庆山,田玉基,等.大跨屋盖结构风致背景响应和共振响应实用组合方法[J].振动与冲击,2014,33(19):199-206.
 [11] 钟炜辉,孟宝,郝际平.不同跨度比下腹板双角钢连接抗倒塌性能研究[J].工程科学与技术,2017,49(4):86-96.
 [12] 钟炜辉,孟宝,郝际平.钢框架栓焊连接梁柱子结构抗倒塌性能分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(2):101-109.

[13] 陆安南,尤明懿.相位干涉仪测向模糊与误差统计分析[J].中国电子科学研究院学报,2018,13(1):42-46.
 [14] 田星星,李征,李利明.计及微电网并离网两种工况的储能容量优化配置[J].电源学报,2018,16(4):62-70.
 [15] RONG C T ,LIN C B ,SILVA Y ,et al.Fast and scalable distributed set similarity joins for big data analytics [C]//Proceedings of the 2017 IEEE 33rd International Conference on Data Engineering.Piscataway ,NJ: IEEE,2017:1-12.