

文章编号:1000-582X(2010)08-064-05

环型空间阵列扭矩传感器读数头测量原理分析

喻洪麟¹,李蓉¹,何安国¹,马升涛¹,吴永峰²

(1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室,重庆400044;2. 西南大学工程技术学院,重庆400715)

摘要:利用球对称特性和交流电磁感应的环型空间阵列扭矩测量原理,讨论了一种适合于极端环境下测量扭矩的环型空间阵列扭矩传感器读数头的工作原理。针对测量扭矩时遇到的难题,设计了读数头电路,并对其进行了仿真实验,获得较为满意的结果。

关键词:环形空间阵列;扭矩传感器;读数头;电路原理研究

中图分类号: TP212.9

文献标志码: A

Electrocircuit principle's research of ring-space array torque sensor's reader head

YU Hong-lin¹, LI Rong¹, HE An-guo¹, MA Sheng-tao¹, WU Yong-feng²

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. College of Engineering and Technology, Xinnan University, Chongqing 400715, P. R. China)

Abstract: Based on the principle of electromagnetic induction of exchange and the measurement principle of the ring-space array torque which is related to the sphere symmetry, the measurement principle of a ring-space array torque sensor is discussed which is fit for measuring in extreme environment. The reader head electrocircuit is designed which is combined with the problems on measurement of mechanical torque in extreme environment. The experimentation is emulated and the preferably satisfied result is gained.

Key words: ring-space array; torque sensor; reader head; electrocircuit principle analysis

在机械传动系统中,尤其是在各类极端环境下的机械主轴传动系统中,扭矩是最能反映其动态性能的典型机械量之一。扭矩测量及分析是保证各种生产及辅助设备安全正常运行和提高系统效率的重要手段之一,通过扭矩传感器对机械主轴传动系统的扭矩分析,可提取有效反映扭矩变化的转角、振角、角加速度等特征参量,进而获得整个传动系统的性能参数^[1-3]。

国内外专家相继开发了一系列扭矩传感器。如日本开发的基于栅降遥测技术的扭矩传感器,装置

小巧但测量电容变化量的电路灵敏度较差^[4]。英国研究了电容式扭矩传感器,成本低可以批量生产,但由于电路中所采用的泄漏电阻和非线性等缺点以及安装问题比较难于实现也没有得到广泛应用^[5]。国内也做了很多研究。比如航天工业总公司的CN5-1型转矩转速传感器、北京三晶创业科技集团的JN338扭矩测量装置。这些扭矩传感器都有其优点,但也存在一些不足。为此,高质量的扭矩传感器及测量方法^[6],是目前国内外的研究热点之一^[7-10]。研究极端环境下扭矩传感器的工作原理迫在眉睫。

收稿日期:2010-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975300)

作者简介:喻洪麟(1954-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事仪器科学与技术、光电技术及系统等研究,
(E-mail)hlyu@cqu.edu.cn。

针对国内外目前对强冲击、高温、高腐蚀、高振动等极端环境下机械转轴扭矩的测量仍无有效检测方法的现状,提出一种基于球对称特性和交流电磁感应原理,采用环型空间阵列器和磁电式检测器组成的新型非接触式扭矩传感器,实现对机械转轴扭矩的在线动态测量。重点对环型空间阵列扭矩传感器读数头电路原理进行研究,根据传感器测量要求,及球对称特性和交流电磁感应原理,讨论了环型空间阵列扭矩传感器的工作原理,进行读数头的电路设计及仿真实验,获得较为满意的效果。

1 传感器结构及读数头工作原理

1.1 传感器结构

传感器主要由标尺,读数头以及固定装置等组成。标尺由一个环型非磁性不锈钢管构成,管内塞满尺寸和磁特性完全相同的磁性高精度的镍铬钢球,钢球在钢管内紧密排列。磁性钢球的具体数量和尺寸根据具体要求和不同测量对象而定。读数头由铝制外壳封装而成,嵌套在环形空间阵列外部,用于屏蔽外部环境的电磁干扰,内部有一个缠绕着特定线圈组的塑料骨架和相应的信号处理电路^[11],其原理结构如图 1 所示。

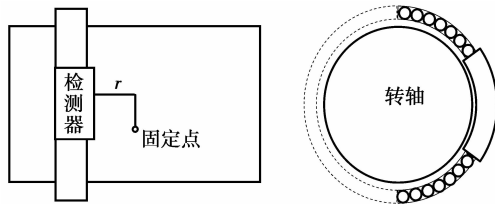


图 1 传感器结构原理图

1.2 工作原理

读数头外部由铝制外壳封装而成。内部由一个由减法器、加法器、超前和滞后 45°移相电路构成的用于信号采集、处理的电路板和缠绕特定绕法线圈组的塑料骨架构成^[12-13]。

线圈组由一个激励线圈和一定个数的接收线圈组成,中间采用绝缘剂贴以铜箔用于避免激励线圈和接收线圈之间的相互作用,其原理如图 2 所示。

每一组接收线圈均包括 A, B, C, D 4 个线圈。它们的宽度均为 $\Phi/4$ (Φ 为小球的半径),且紧密排列无间隔。接收线圈所切割磁性小球的面积变换近似呈正弦变化^[14]。因而磁导率也成周期性变化。又由于互感系数 M_0 一般与磁体的性质以及所切割的面积有关。所以,互感系数 M_0 也成正弦变化,且

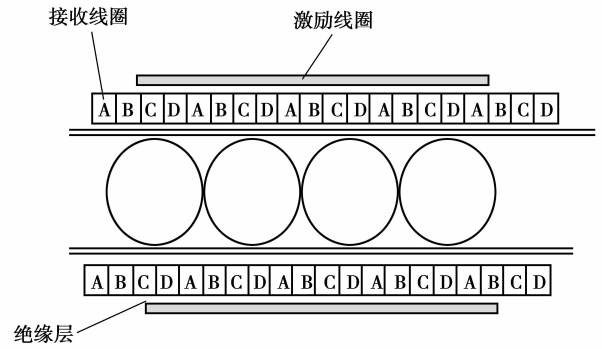


图 2 读数头线圈排列示意图

每一个的相位差为 90°。又由于输出电压信号幅值正比于互感系数 M_0 ^[15],即

$$\dot{U}_{21} = j\omega M_0 \dot{U} / (r_1 + j\omega L_1), \quad (1)$$

其中: r_1 为驱动线圈的有效电阻; \dot{U} 为驱动电压对应的相量; L_1 为驱动线圈电感。

$$|U_0| \propto M_0, \quad (2)$$

假设转轴受到扭矩的作用,读数头相对于标尺移动了 x 的角位移,激励电压为 $U_{1m} \sin \omega t$ 则互感系数 M_0 的表达式为

$$M_0 = k_2 (\sin(2\pi x / \Phi) + A), \quad (3)$$

经计算,4 个接收线圈的感应电压有效值分别为

$$U_A = kU_1 (\sin(2\pi x / \Phi) + A), \quad (4)$$

$$U_B = kU_1 (\sin(2\pi x / \Phi + \pi/2) + A), \quad (5)$$

$$U_C = kU_1 (\sin(2\pi x / \Phi + \pi) + A), \quad (6)$$

$$U_D = kU_1 (\sin(2\pi x / \Phi + 3\pi/2) + A). \quad (7)$$

式中: k, k_2 为比例系数; A 为感应系数的直流分量; \dot{U}_1 为激励线圈输入电压有效值。

以上 4 路信号再经过信号处理,如图 3 所示,就得到一个正比与角位移量 x 的调相信号

$$u_{out} = K \sin(2\pi x / \Phi + \omega t - 45^\circ). \quad (8)$$

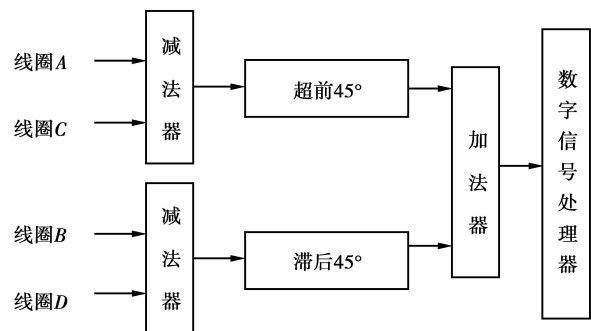


图 3 读数头信号处理框图

可以看出,当轴只受到扭矩的作用时,轴两端所加 2 个环型空间阵列扭矩传感器输出的电压信号频率相同但相位不同,其差值正是转轴的与扭矩成线性关系的扭转角 φ 。经过 AD 转换,最终送入 DSP 进行处理。即可知扭转角的大小,既而通过公式 $M = GI_P\varphi/l$ 就可以得到扭矩的大小。(G 为切变模

量, I_P 为极惯性矩,对直径为 Φ 的圆轴, $I_P = \pi\Phi^4/32$)

2 读数头电路原理设计与仿真

2.1 读数头电路原理设计

设计的读数头电路原理如图 4 所示。

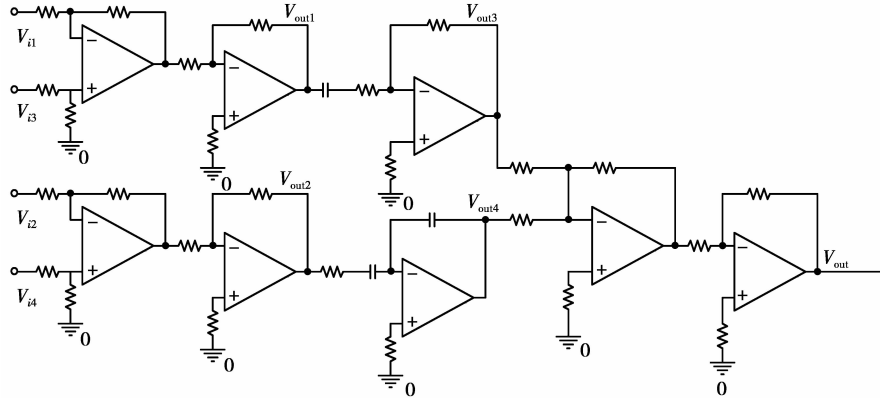


图 4 读数头电路图

2.2 电路仿真实验

对设计的读数头电路,以一组接收线圈(包括线圈 A、B、C、D)为例进行仿真。安排线圈使读数头至少完全覆盖 5 个球,以减少因每个球的公差而造成的误差,也为了更好的通过感应电压幅值变化计算读数头与标尺的相对位移量。当驱动线圈输入 f 为 10 kHz 交变电流时,沿环型空间阵列器轴向方向感应出相同频率的交变磁场,环型空间阵列器的磁导率以钢球直径为周期进行周期性变化,每组接收线圈中感应电压随线圈与球的相对位置变化而变化,感应信号的幅值如图 5 所示。正如图中所示, A 和 C 以及 B 和 D 互为反相信号。当 A 组线圈感应电压幅值为最大时, C 组线圈为最小。将 A、C 作为一线圈对进行差分运算得 A-C 信号 V_{out1} , 输出电压

$$V_{out1} = V_{iA} - V_{iC} = k\sin\omega t \tag{9}$$

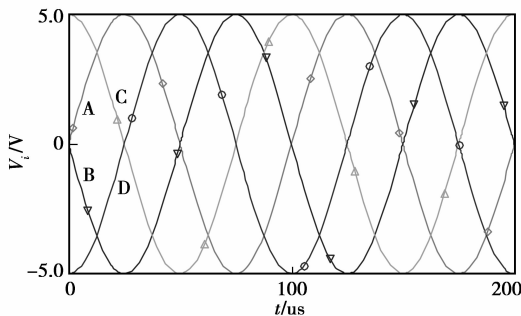


图 5 线圈感应电压信号

同理可得 D-B 信号 V_{out2} ,

$$V_{out2} = V_D - V_B = k_1 \cos\omega t \tag{10}$$

(k, k_1 为比例系数), 见图 6。这对信号经过差分混合将产生与原始感应信号有一定相位差的中间信号。这 2 组信号在频率为 10 kHz 时, 将 V_{out1} 信号的相位超前 45° 得到 V_{out3} , 同时将 V_{out3} 信号的相位滞后 45° 得到 V_{out4} , 见图 7。经叠加、滤波后得到输出信号的相位随读数头与环型空间阵列器的相对位移变化而变化, 将随其在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化。且输出信号峰-峰值约为 5 V, 直流分量为 5 V, 见图 8 所示。

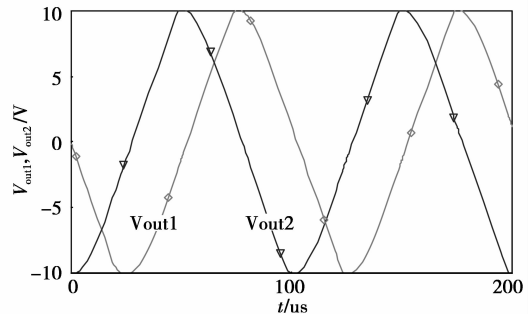


图 6 V_{out1}, V_{out2} 波形图

由图可以看出 2 列信号幅值有较大偏差, 但我们关心的是他们相角的关系, 所以不影响输出结果的鉴定。在机械传动试验台上, 对环形空间阵列扭矩传感器进行了实验。将 2 个扭矩传感器安装在间距为 1 m 的转轴的两端。使用激励信号为 5 V、1 kHz 的电压信号, 用 5.08 MHz 的时钟脉冲注入到

10 kHz 标准方波与调相信号方波的相移空间内,获得 5 080 倍细分值,经微机采集处理,可以得到该环

形空间阵列扭矩传感器进行测量得到的数据,见表 1 所示。

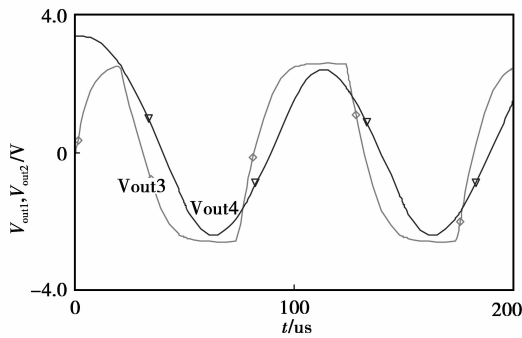


图 7 V_{out3} 、 V_{out4} 波形图

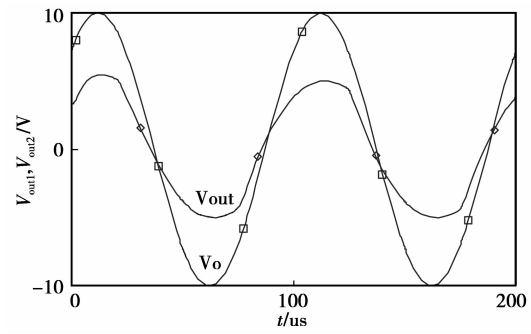


图 8 V_{out} 与理论值 V_o 的波形图

表 1 传感器测量的实验数据

理论值 $M/(N \cdot m)$	6.000	10.000	16.000	20.000	30.000	32.000	34.000
实际值 $M/(N \cdot m)$	5.985	10.244	15.975	19.975	30.000	31.975	34.024
相对误差/%	-0.025	0.244	0.156	0.125	0.00	0.078	0.071

从表 1 中可以看出,环型空间阵列扭矩传感器测量的相对误差 $< 0.3\%$,满足极端环境下扭矩的测量要求。

3 结 论

重点对环型空间阵列扭矩传感器读数头电路原理进行了研究,根据传感器测量要求,及球对称特性和交流电磁感应原理,讨论了环型空间阵列扭矩传感器的工作原理,进行了读数头的电路原理设计及仿真实验,理论计算和仿真实验表明设计的读数头电路原理方案可行,满足测量要求。

参考文献:

[1] ELIAS C N, FIGUEIRA D C, RIOS P R. Influence of the coating material on the loosening of dental implantabutment screw joints[J]. Materials Science and Engineering C, 2006, 26(8): 1361-1366.
 [2] OHTA H, KANATSU M. Running torque of ball bearings with polymer lubricant[J]. Tribology Transactions, 2005, 48(4): 272-279.
 [3] CLANCY E A, BIDA O, RANCOURT D. Influence of advanced electromyogram (EMG) amplitude processors on EMG-to-torque estimation during constant-posture, force-varying contractions[J]. Journal of Biomechanics, 2006, 39(14): 2690-2698.
 [4] GARSHELIS I J, KARI R J, TOLLENS S P L. Arate

of change of torque sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2388-2390.

[5] SALACH J, BIENKOWSKI A, SZEWCZYK R. New possibilities of utilizing metallic glasses as torque sensors [J]. IEEE Transactions on Sensors, 2004, 110: 505-507.
 [6] 商维绿, 缪德源. 现代扭矩测量技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
 [7] 欧大生, 张剑平, 秦建文. 磁电式相位差转矩测量技术研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30(4): 99-102.
 OU DA-SHENG, ZHANG JIAN-PING, QIN JIAN-WEN. Study of magnetoelectric and dephased measurement technology of torque [J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(4): 99-102.
 [8] 高长银, 赵辉. 新型压电扭矩传感器的结构与标定[J]. 仪表技术与传感器, 2006, 5(5): 6-10.
 GAO CHANG-YIN, ZHAO HUI. Structure and calibration of a new piezoelectricity torque sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2006, 5(5): 6-10.
 [9] 叶林, 周弘, 张洪. 相位差的几种测量方法和测量精度分析[J]. 电测与仪表, 2006, 43(484): 11-14.
 YE LIN, ZHOU HONG, ZHANG HONG. Analysis of several methods and precises for measurement of phase difference[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(484): 11-14.
 [10] 刘强, 于涌川. 电感式扭矩传感器在电动助力转向系统中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2009(5): 37-39.
 LIU QIANG, YU YONG-CHUAN. Inductance torque

- sensor using for electromotion aid steering system[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2009(5):37-39.
- [11] 喻洪麟, 巴军, 何安国. 环型空间阵列扭矩传感器设计及电磁分析[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(8):1687-1691.
YU HONG-LIN, BA JUN, HE AN-GUO. Design and electromagnetic analysis of ring-space array torque sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(8):1687-1691.
- [12] LEE J Y, KAUH S K, HA K P. Development of a disc-type torque meter for an automatic transmission vehicle[J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2005, 219(12): 1443-1449
- [13] DOONER D B, ZAMBRANAM N. Use of non-circular gears for crankshaft torque balancing in I. C [J]. *Engines*, 2005, 1904(1): 197-212
- [14] 何安国, 鲁双全. 球栅尺读数头电路系统研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2008(9):109-112.
HE AN-GUO, LLU SHUANG-QUAN. Research on reader head electrocircuit system for spherosyn TM encoder [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008(9):109-112.
- [15] 徐游. 电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

(编辑 陈移峰)



(上接第 45 页)

- [8] 汤胜清, 程小华. 一种基于多层前向神经网络的谐波检测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(18):90-94.
TANG SHENG-QING, CHENG XIAO-HUA. A harmonic measuring approach based on multilayered feed forward neural network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(18):90-94.
- [9] 贾俊川, 李大勇, 李卫国, 等. 基于多层前向神经网络的基波检测方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 10(37):101-105.
JIA JUN-CHUAN, LI DA-YONG, LI WEI-GUO, et al. An approach to fundamental detection based on multi-layered feed forward neural network [J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 10(37):101-105.
- [10] LU Z G, LI B, YI Z G, et al. A gradient recurrence algorithm for neural networks[J]. *Control Theory and Applications*, 2005, 24 (7):16-18.
- [11] CAI B P, LIU Y H, YU L L. Research on space vector PWM based on wavelet neural network [J]. *Theory Research*, 2009, 9: 1-4.
- [12] NEGNEVITSKY M, RINGROSE M. Monitoring multiple harmonic sources in power systems using neural networks[J]. *Power Tech, IEEE Russia*, 2005: 1-6.
- [13] TOBIAS H, JOERG W. Survey of the present state of the art of piezoelectric linearmotors [J]. *Ultrasonics*, 2006, 38:37-40.
- [14] 武美先, 张学良, 温淑花, 等. BP 神经网络及其改进 [J]. *太原科技大学学报*, 2005, 26(2):120-131.
WU MEI-XIAN, ZHANG XUE-LIANG, WEN SHU-HUA, et al. Summarization of BP neural network's improvement [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2005, 26(2):120-131.
- [15] 胡新晚, 宋绍民, 廖代文. 基于 BP 神经网络的谐波检测方法的研究 [J]. *广西轻工业*, 2009, 2(2):64-66.
HU XIN-WAN, SONG SHAO-MIN, LIAO DAI-WEN. Harmonic detection method research based on BP Network [J]. *Guangxi Journal of Light Industry*, 2009, 2(2):64-66.

(编辑 侯湘)