

## Research on a Novel Electromagnetic Induction Torque Sensor\*

ZHAO Hao<sup>1</sup>, DING Lijun<sup>1</sup>, FENG Hao<sup>1,2\*</sup>, WU Xiaoyang<sup>1</sup>

(1. Nanhu College of Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang 314001, China; 2. Automation College of Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** It is important to measure the rotating machinery torque accurately for its condition monitoring and fault diagnosis, therefore, a new structure torque sensor based on electromagnetic induction principle is designed in this paper. The method is to convert torsion angle produced by load torque into the angle displacement of sensor excitation windings and output windings, the excitation windings set up pulsating flux, then output windings produce induction potential which is proportional to the angular displacement through electromagnetic coupling. The output characteristic of sensor is deduced, and its mathematical models are constructed, including the transfer function and state space description. The controllability and observability of sensor are analyzed, and its asymptotic stability is proved according to Lyapunov stability criterion. The sensor is calibrated by torsion testing machine, the experimental results indicated the sensitivity of the sensor is  $2.8 \text{ mV}/(\text{N}\cdot\text{m})$ , the maximum repeatability error is 1.24%, the maximum non-linear error is 0.78%, the maximum hysteresis error is 0.79%.

**Key words:** torque sensor; electromagnetic induction; mathematical model; calibration

EEACC: 7230; 7320E

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.05.006

## 一种新型磁电感应式转矩传感器的研制\*

赵浩<sup>1</sup>, 丁立军<sup>1</sup>, 冯浩<sup>1,2\*</sup>, 吴晓阳<sup>1</sup>

(1. 嘉兴学院南湖学院, 浙江嘉兴 314001; 2. 杭州电子科技大学自动化学院, 杭州 310018)

**摘要:** 旋转机械设备转矩的准确测量对实现设备的状态监测和故障诊断有重要的作用, 为此, 设计了一种基于电磁感应原理的新结构转矩传感器。方法是将负载转矩产生的扭角信号转化成传感器励磁绕组和输出绕组的角位移, 励磁绕组建立脉振磁通, 经过电磁耦合输出绕组会产生与该角位移成正比的感生电动势。推导了传感器的输出特性, 构建了传感器的数学模型, 包括传递函数和状态空间描述。分析了传感器工作时的能控性和能观性, 根据李雅普诺夫稳定判据, 证明了传感器工作时的渐进稳定性。最后对传感器进行了标定, 实验结果是传感器的灵敏度约为  $2.8 \text{ mV}/(\text{N}\cdot\text{m})$ , 最大重复性误差约为 1.24%, 最大非线性误差约为 0.78%, 最大迟滞误差约为 0.79%。

**关键词:** 转矩传感器; 电磁感应; 数学模型; 标定

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2014)05-0600-05

转矩是各种机械传动轴的基本载荷形式, 与动力机械的工作能力、能源消耗、效率、运转寿命及安全性等因素紧密联系, 转矩的测量关系到传动轴载荷的确定与控制、传动系统工作零件的强度设计以及原动机容量的选择等等。随着电子计算机、生产自动化、现代信息、交通、冶金、能源、宇航等科学技术的发展和各行各业生产发展的需要, 转矩测量技术得到了人们的高度重视而成为测试领域发展较快的学科, 在汽

车、机器人、柴油机、石油、农业机械、船舶运输、交通、冶金等多方面获得了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。

目前在转矩测量中, 传递类转矩传感器应用十分广泛。传递类转矩传感器按转矩信号的产生方式可分为光学式、光电式、磁电式、应变式、电容式等等, 其中市场上较成熟的转矩传感器主要是磁电式和应变式。磁电式转矩传感器通过磁电感应获取转矩信号, 德国 HBM 公司、日本小野测器和中国湘西

项目来源: 浙江省自然科学基金项目 (LQ14E050007); 浙江省教育厅科研项目 (Y201330056); 嘉兴市科技计划项目 (2012AY1021); 嘉兴学院南湖学院科研重点课题项目 (N41472001-4)

收稿日期: 2014-02-19 修改日期: 2014-04-18

仪表厂均有生产,传感器输出信号的本质是两路具有相位差的角位移信号,需要对信号进行组合处理才能得到转矩信息。它是非接触式传感器,无磨损、无摩擦,可用于长期测量,不足之处是体积大,不易安装,不能测量静止转矩;应变式转矩传感器以电阻应变片为敏感元件,如德国 HBM 公司的 T1, T2, T4 系列转矩传感器、北京三晶集团的 JN338 系列传感器等,它们在转轴或与转轴串接的弹性轴上安装四片精密电阻应变片,并连接成惠思顿电桥,转矩使轴的微小变形引起应变阻值发生变化,电桥输出的信号与转矩成比例。传感器可以测量静态和动态转矩、高频冲击和振动信息,具有体积小重量轻等优点,不足之处是信号的传输易受干扰且损耗较大,导致测量精度不是很高。

近年来许多专家在转矩测量方面进行了大量的研究,设计了多种新型转矩或扭矩测量装置,包括基于激光多普勒效应的扭矩传感器<sup>[4]</sup>、环形球栅式扭矩传感器<sup>[5]</sup>、环型空间阵列式扭矩传感器<sup>[6]</sup>、基于螺管形差动变压器的非接触式扭矩传感器<sup>[7]</sup>、测量超高速回转轴扭矩的光栅式转矩传感器<sup>[8]</sup>、高速光电反射式转速转矩传感器<sup>[9]</sup>、基于纳米晶软磁合金的非接触中式转矩传感器<sup>[10]</sup>、基于空气轴承支撑技术的扭矩标准机<sup>[11]</sup>和一种基于铁基非晶态合金的非接触半套环式新型扭矩传感器<sup>[12]</sup>等等。

本文提出了一种基于电磁感应原理的新型转矩传感器,可以测量旋转机械的静态扭矩和动态转矩,详细阐述了传感器的机械结构和测量原理。为了更加深入的揭示传感器的特性,构建了传感器的传递函数和状态空间模型,并通过李雅普诺夫稳定判据验证了整个传感器系统是大范围渐进稳定的。最后采用扭转试验机对传感器进行了标定,得到了传感器的各项性能指标。

## 1 传感器机械结构

设计的电磁感应式转矩传感器剖面图如图 1 所示,主要部件包括传感器轴、励磁绕组、励磁铁心、输出铁心和输出绕组,当测量旋转系统转矩时,需外接导电滑环,用于将励磁电压引入和输出绕组电信号引出。

传感器轴同心外设输出铁心,输出铁心一端与传感器轴固定,另一端通过轴承与传感器轴固定且可以相对传感器轴转动,输出绕组置于输出铁心槽内。传感器轴同心外设励磁铁心,励磁铁心一端与传感器轴固定,另一端通过轴承与输出铁心固定且可以相对输出铁心转动,励磁绕组固定在励磁铁心上。励磁绕组的轴线与输出绕组的轴线垂直,励磁

绕组和输出绕组同为单相绕组,两相绕组的引出头通过滑环与机壳的接线端连接。传感器的实物图如图 2 所示,其中导电滑环部分可以直接购置。

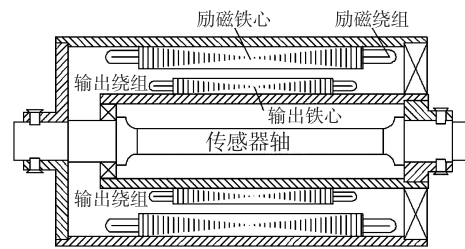


图 1 传感器剖面图

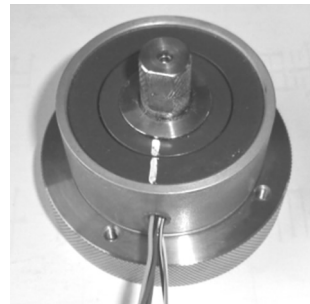


图 2 传感器实物图

## 2 传感器工作原理

当一根弹性轴受到负载转矩作用时,弹性轴两端截面产生一个扭转角  $\Delta\theta$ ,在弹性范围内,扭转角与负载转矩存在如下关系式<sup>[13]</sup>:

$$\Delta\theta = \frac{32TL}{\pi D^4 G} \quad (1)$$

式中  $\Delta\theta$  为轴的扭转角(rad);  $T$  为负载转矩(N·m);  $L$  为轴的工作长度(m);  $D$  为轴的直径(m);  $G$  为轴材料的剪切模量(N/m<sup>2</sup>)。

传感器的励磁绕组和输出绕组的初始位置如图 3 所示,两相绕组的轴线互相垂直,其中励磁绕组通入交变电流建立脉振磁场,无负载转矩作用时,脉振磁场与输出绕组没有匝链,输出绕组的感应电势  $e_o = 0$ ;当传感器轴受到负载转矩作用时,输出绕组相对初始位置产生角位移  $\Delta\theta$ ,励磁脉振磁场与输出绕组匝链,输出绕组的感应电势  $e_o \neq 0$ 。

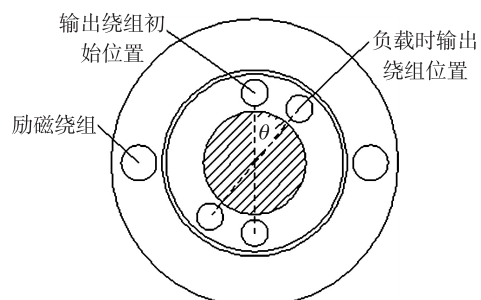


图 3 传感器工作原理图

根据磁路定理,励磁绕组通交变电流  $i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t)$  时气隙的瞬时磁通为:

$$\phi = \frac{\sqrt{2} W_1 I_1 \sin(\omega t)}{\frac{\delta_0}{\mu_0 S_0} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{l_{fi}}{2\mu_f S_{fi}} + \frac{l_{ii}}{\mu_i S_{ii}} \right)} \quad (2)$$

式中  $W_1$  为励磁绕组有效匝数;  $I_1$  为励磁电流有效值;  $\omega$  为励磁电流角频率;  $\delta_0$  为磁路气隙的有效长度;  $\mu_0$  为空气的磁导率;  $S_0$  为磁路气隙的有效面积;  $l_{fi}$  为磁路中磁通经过励磁铁心的各段有效长度;  $\mu_f$  为励磁铁心的磁导率;  $S_{fi}$  为磁路中磁通经过励磁铁心的各段有效面积;  $l_{ii}$  为磁路中磁通经过输出铁心的各段有效长度;  $\mu_i$  为输出铁心的磁导率;  $S_{ii}$  为磁路中磁通经过输出铁心的各段有效面积; 气隙的磁通密度为  $B_\delta = \phi/S_0$ 。

当输出绕组相对初始位置产生角位移  $\Delta\theta$  时,输出绕组与磁通匝链的有效面积为  $S_2$ , 则与输出绕组匝链的磁通量为  $\phi_o = B_\delta S_2 \sin\theta$ 。输出绕组的有效匝数为  $W_2$ , 根据电磁感应定理,输出绕组产生的感应电势为:

$$e_o = -W_2 \frac{d\phi_o}{dt} = \frac{\sqrt{2} W_1 W_2 \omega I_1 S_2}{S_0 \left[ \frac{\delta_0}{\mu_0 S_0} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{l_{fi}}{2\mu_f S_{fi}} + \frac{l_{ii}}{\mu_i S_{ii}} \right) \right]} \cdot \sin\theta \cdot \sin(\omega t - 90) \quad (3)$$

由式(1)和式(3)得输出绕组感应电势有效值为:

$$E_o = \frac{W_1 W_2 \omega I_1 S_2}{S_0 \left[ \frac{\delta_0}{\mu_0 S_0} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{l_{fi}}{2\mu_f S_{fi}} + \frac{l_{ii}}{\mu_i S_{ii}} \right) \right]} \cdot \sin\theta \approx \frac{W_1 W_2 \omega I_1 S_2 \cdot 32L}{S_0 \left[ \frac{\delta_0}{\mu_0 S_0} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{l_{fi}}{2\mu_f S_{fi}} + \frac{l_{ii}}{\mu_i S_{ii}} \right) \right]} \pi D^4 G \quad (4)$$

由此可知,输出绕组感应电势的有效值  $E_o$  和负载转矩成正比关系,通过实验标定得到其比例系数,就可以通过测量  $E_o$  得到负载转矩  $T$  的大小。

### 3 数学模型

#### 3.1 传递函数

励磁绕组通交变励磁电压  $u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t)$ , 产生交变励磁电流  $i_1$ , 励磁绕组电感为  $L_1$ , 电阻为  $r$ , 漏感为  $L_{1\sigma}$ , 励磁回路电压平衡方程为:

$$u_1 = i_1 r + (L_1 + L_{1\sigma}) \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

励磁绕组磁场与输出绕组匝链的磁通  $\phi_2 = Ki_1 \sin\theta \approx Ki_1 \theta$  ( $K$  为与励磁绕组磁化比例系数和输出绕组有效面积相关的常数), 则输出绕组的感应

电势为:

$$e_o = -W_2 \frac{d\phi_2}{dt} = -KW_2 \theta \frac{di_1}{dt} \quad (6)$$

传感器工作时接负载  $Z$ , 输出绕组存在电阻  $R$  和漏感  $L_{2\sigma}$ , 输出绕组电流为  $i_2$ , 输出绕组电压平衡方程为:

$$e_o = i_2 (R+Z) + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} \quad (7)$$

由式(3)可知,输出感应电势的相位落后励磁电压  $90^\circ$ , 所以负载  $Z$  (纯阻性) 两端的输出电压为  $u_2 = i_2 Z = -\sqrt{2} U_2 \cos(\omega t)$ 。对式(5)~式(7)进行拉氏变换并整理得传感器传递函数为:

$$G(s) = \frac{U_2(s)}{\theta(s)} = \frac{KW_2 U_1 Z \omega}{[r + (L_1 + L_{1\sigma})s][R + Z + L_{2\sigma}s]} \quad (8)$$

系统的极点为  $s_1 = -\frac{r}{L_1 + L_{1\sigma}}$ ,  $s_2 = -\frac{R+Z}{L_{2\sigma}}$ , 由于负载电阻  $Z$  较大且输出绕组漏感  $L_{2\sigma}$  较小, 所以系统的主导极点为  $s_1$ , 即  $G(s) \approx \frac{KW_2 U_1 Z \omega}{r + (L_1 + L_{1\sigma})s}$ , 系统可以近似看作是比例环节和惯性环节的串联, 其中惯性环节时间常数为  $L_1 + L_{1\sigma}/r$ 。

#### 3.2 状态空间模型及分析

选取适当的状态变量, 由系统的传递函数(8)可以得到系统状态空间模型的对角型为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{r}{L_1 + L_{1\sigma}} & 0 \\ 0 & -\frac{R+Z}{L_{2\sigma}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \theta = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \mathbf{B} \theta \\ y &= \begin{bmatrix} KW_2 U_1 Z \omega (L_1 + L_{1\sigma}) & KW_2 U_1 Z \omega L_{2\sigma} \\ (R+Z)(L_1 + L_{1\sigma}) - rL_{2\sigma} & - (R+Z)(L_1 + L_{1\sigma}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

传感器的状态变量见图4。

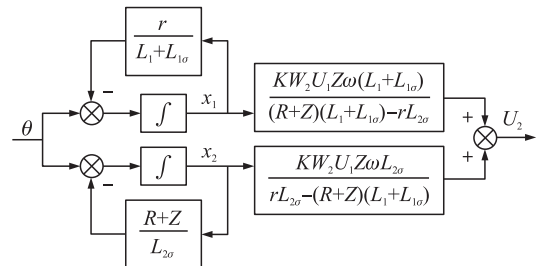


图4 传感器状态变量图

且由式(9)可知,传感器的能控性判别矩阵为:

$$S_c = [\mathbf{B} \quad \mathbf{AB}] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{r}{L_1 + L_{1\sigma}} \\ 1 & -\frac{R+Z}{L_{2\sigma}} \end{bmatrix}$$

由于  $\text{rank } S_c = 2$ , 即由  $A, B$  构成的能控性判别矩阵  $S_c$  满秩, 所以系统的状态完全能控; 传感器的能观

性判别矩阵为:

$$S_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{KW_2 U_1 Z \omega (L_1 + L_{1\sigma})}{(R+Z)(L_1 + L_{1\sigma}) - rL_{2\sigma}} & \frac{KW_2 U_1 Z \omega L_{2\sigma}}{rL_{2\sigma} - (R+Z)(L_1 + L_{1\sigma})} \\ \frac{KW_2 U_1 Z \omega (L_1 + L_{1\sigma}) r}{[rL_{2\sigma} - (R+Z)(L_1 + L_{1\sigma})](L_1 + L_{1\sigma})} & \frac{KW_2 U_1 Z \omega L_{2\sigma} (R+Z)}{[(R+Z)(L_1 + L_{1\sigma}) - rL_{2\sigma}]L_{2\sigma}} \end{bmatrix}$$

$\text{rank } S_o = 2$ , 即由  $A, C$  构成的能观性判别矩阵  $S_o$  满秩, 所以系统的状态完全能观。

系统的稳定性分为外部稳定性和内部稳定性, 外部稳定性是在零初始状态下, 外部输入对系统响应的判断。内部稳定性是只考虑系统自身初始状态对系统的影响, 也叫做李雅普诺夫意义下的渐进稳定。由式(8)可知, 传递函数的 2 个极点都具有负实部, 所以系统是外部稳定的。根据式(9)可以得到系统的状态矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L_1 + L_{1\sigma}} & 0 \\ 0 & -\frac{R+Z}{L_{2\sigma}} \end{bmatrix}$$

**引理** 线性系统内部稳定的充分必要条件是, 给定一正定的实对称阵  $Q(t)$ , 存在一个正定实对称矩阵  $P(t)$ , 使得李雅普诺夫矩阵微分方程:  $A^T(t)P(t) + \dot{P}(t) + P(t)A(t) = -Q(t)$  成立。对于线性定常系统,  $A(t) = A, P(t) = P$  为常量矩阵, 李雅普诺夫方程变为:  $A^T P + PA = -Q = -I$ 。

令  $P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{bmatrix}$ , 将状态矩阵  $A$  代入方程得:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{L_1 + L_{1\sigma}}{2r} \\ p_2 = p_3 = 0 \\ p_4 = \frac{L_{2\sigma}}{2(R+Z)} \end{cases}$$

由于:  $p_1 > 0$  且,  $\begin{vmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{vmatrix} = \frac{(L_1 + L_{1\sigma})L_{2\sigma}}{4r(R+Z)} > 0$ , 因此矩阵

$P$  正定, 工作时的系统在李雅普诺夫意义下是大范围渐进稳定的。

### 4 传感器标定

采用 NN-100A 型扭转试验机对设计的传感器进行标定, 它有 3 种量程: 200 N·m、500 N·m 和 1 000 N·m; 相应的测量精度分别为 0.4、1.0 和 2.0; 适用于直径  $D$  为 10 mm ~ 20 mm, 长度  $L$  为 100 mm ~ 600 mm 的试件。

本文设计的转矩传感器转轴直径为  $D = 15$  mm, 长度  $L = 200$  mm, 实验开始前对传感器轴承受的强度进行核算, 轴所受的最大剪应力必须小于材料所允许的剪切强度极限, 即:  $\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{0.2D^3} \leq \tau$ , 其中  $\tau =$

$(0.8 \sim 1)\sigma = (0.8 \sim 1)\frac{\sigma_s}{n_s}$ ,  $n_s$  为安全系数;  $\sigma$  为许用应力(N/mm<sup>2</sup>);  $\sigma_s$  为极限应力, 即材料发生破坏时的应力(N/mm<sup>2</sup>)。一般情况下, 静载时安全系数  $n_s = 1.2 \sim 1.5$ , 这里取  $n_s = 1.2$ , 得到传感器轴能够承受的最大转矩的计算公式为:  $T_{\max} \leq \frac{2D^3 \sigma_s}{15}$ 。传感器轴弹性轴材料为 40Cr, 可查得  $\sigma_s = 785$  N/mm<sup>2</sup>, 由此得  $T_{\max} \approx 353$  N·m, 因此试验机的量程选用 500 N·m。传感器所加交流励磁电压为 7 V, 频率  $f = 10$  kHz, 加载到 300 N·m 后开始卸载, 得到如表 1 所示的实验数据。得到传感器的灵敏度约为 2.8 mV/(N·m); 最大非线性误差约为 0.78%; 最大迟滞误差约为 0.79%; 最大重复性误差约为 1.24%。

表 1 传感器标定实验结果

		载荷 $T$ (N·m)									加载次序	
		30	58	91	123	151	178	215	238	271		
输出绕组电压 $E_o$ /mV	第一次	84.2	163.2	258.5	350.6	431.8	501.7	618.4	678.5	770.8	858.9	加载
		86.7	165.1	261.7	352.5	437.3	508.5	619.3	680.1	775.2	862.1	卸载
	第二次	83.1	164.3	260.8	350.5	428.8	506.4	613.2	677.7	778.3	862.1	加载
		86.4	168.1	263.3	355.7	435.2	508.8	617.3	682.2	780.9	862.1	卸载
	第三次	85.3	163.8	259.1	348.3	432.3	505.7	612.3	675.5	769.4	857.7	加载
		84.6	166.7	263.6	353.2	436.1	512.4	615.3	681.1	770.2	857.7	卸载

## 5 结论

提出了一种电磁感应式转矩传感器,可以测量静态扭矩和动态转矩,其测量原理的正确性和系统的稳定性通过实验和理论分析得到了验证。对传感器进行了标定,灵敏度约为  $2.8 \text{ mV}/(\text{N}\cdot\text{m})$ ;最大非线性误差约为  $0.78\%$ ;最大迟滞误差约为  $0.79\%$ ;最大重复性误差约为  $1.24\%$ 。后续工作的重点为:拟采用增加环形变压器和补偿绕组的方法,改善传感器的输出特性;拟开发基于 Labview 的信号处理装置,使传感器能够进行实用化的推广。

### 参考文献:

- [1] 郭闯强,倪风雷. 具有力矩传感器的柔性关节的振动抑制[J]. 机器人,2011,33(4):449-454.
- [2] 胡明江,王忠,祁利巧,等. 转矩传感器在柴油机低温阻力矩中的应用[J]. 仪表技术与传感器,2009(1):9-11.
- [3] 吴强,廖勇. 一种新型转矩检测技术及其在抽油机示功图中的应用[J]. 电机与控制,2010,37(3):55-60,65.
- [4] 刘彬,吕宏诗. 一种激光多普勒扭矩传感器的设计原理研究[J]. 传感技术学报,2004(2):252-254.
- [5] 吴永峰,喻洪麟,何安国. 环形球栅扭矩测量原理研究[J]. 仪器仪表学报,2010,31(11):2580-2585.
- [6] 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.
- [7] 余成波,张莲,陈学军,等. 基于螺管形差动变压器的非接触式扭矩传感器的研究[J]. 传感技术学报,2006,19(3):713-715.
- [8] 金远强,胡丽国,杨乐民. 超高速回转轴转矩测试原理与动态特性分析[J]. 导弹与航天运载技术,2007(2):39-42,61.
- [9] 余以道,文泽军,罗善明,等. 高速光电反射式转矩转速传感器及其试验研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(3):610-614.
- [10] 石延平,范书华,臧勇. 一种用于检测转角、转速和转矩的新型多功能非接触式传感器[J]. 传感技术学报,2012,25(3):378-382.
- [11] 张智敏,李涛,张跃,等. 全自动高准确度  $100 \text{ N}\cdot\text{m}$  扭矩标准机[J]. 计量学报,2010,31(1):1-4.
- [12] 石延平,臧勇,周庆贵. 基于铁基非晶态合金的非接触半套环式扭矩传感器的研究[J]. 机械工程学报,2012,48(12):13-17.
- [13] 张有硕. 转矩测量技术[M]. 北京:计量出版社,1986.



赵浩(1983-),男,讲师,主要研究方向为新结构传感器的设计、电机振动特性分析及抑制方法研究。主持浙江省自然科学基金和浙江省教育厅科研项目等多项课题,在 Sensors、VIBROENG J 和传感技术学报、计量学报等期刊上发表 10 多篇论文,zhaohao204@163.com;



丁立军(1979-)男,讲师,从事电气自动化相关的教学科研工作。主要研究方向为信号检测与处理,图像工程。发表相关论文 10 多篇,多数被 SCI 和 EI 检索,dlijun2009@126.com;



冯浩(1956-),男,博士,教授,博士生导师,浙江宁波人,现为杭州电子科技大学纪委书记,一直从事电机与检测、人工智能神经网络技术与应用方面的研究和开发工作。曾主持国家自然科学基金、浙江省重大科技专项、留学回国人员基金、浙江省自然科学基金等课题多项;已发表论文 60 余篇,其中有多篇论文被 SCI、EI 收录,zjhzhf@126.com。