

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905837

# 基于结构解耦的新型电容式力矩传感器设计\*

蒲明辉<sup>1</sup>, 冯向楠<sup>1</sup>, 罗国树<sup>1</sup>, 梁旭斌<sup>1</sup>, 潘海鸿<sup>1,2</sup>

(1. 广西大学机械工程学院 南宁 530004; 2. 广西制造系统与先进制造技术重点实验室 南宁 530004)

**摘要:**为解决力矩传感器中由于倾覆力矩、轴向力和径向力等所造成的力耦合效应和测量误差问题,基于结构解耦原理设计了一种新型电容式力矩传感器。该新型电容式力矩传感器利用内置交叉滚子轴承实现结构解耦,从而消除力耦合效应对测量准确性的影响。测量部分采用垂直极板电容效应原理,并以双差动的测量方式提高传感器的灵敏度和稳定性。以商用转矩转速传感器作为标准力矩仪对此新型电容式力矩传感器进行标定,并进行解耦验证实验。标定和实验结果表明,该新型电容式力矩传感器的线性度为1.04%、分辨率0.05 N·m、最大测量误差约为2.07%,所设计的传感器能够有效降低力耦合效应的影响,具备结构解耦、高灵敏度和高准确性等特点。

**关键词:**力矩传感器;力耦合效应;解耦;垂直极板电容效应;双差动

中图分类号: TP212.1 TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## Design of novel capacitive type torque sensor based on structural decoupling

Pu Minghui<sup>1</sup>, Feng Xiangnan<sup>1</sup>, Luo Guoshu<sup>1</sup>, Liang Xubin<sup>1</sup>, Pan Haihong<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System and Advanced Manufacturing Technology, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of force coupling effect and measurement error of torque sensor caused by overturning torque, axial force and radial force, a novel capacitive type torque sensor is designed based on the principle of structural decoupling. The novel capacitive type torque sensor uses the built-in crossed roller bearing to achieve structural decoupling, thereby the influence of force coupling effect on measurement accuracy is eliminated. The measurement section adopts the principle of vertical plate capacitance effect and uses double differential measurement mode to improve the sensitivity and stability of the sensor. A commercial torque speed sensor was used as the standard torque meter to calibrate this novel capacitive type torque sensor and conduct decoupling verification experiment. The calibration and experiment results are as follows: the linearity of the novel capacitive type torque sensor is 1.04%, the resolution is 0.05 N·m and the maximum measurement error is about 2.07%, which indicates that the designed sensor can effectively reduce the influence of force coupling effect and possesses the features of structural decoupling, high sensitivity and high accuracy.

**Keywords:** torque sensor; force coupling effect; decoupling; vertical plate capacitance effect; dual differential

## 0 引言

力矩传感器被广泛应用于机器人柔顺控制、阻抗控制、碰撞检测以及拖动示教等多种控制领域<sup>[1-2]</sup>,为机器人的力控制和运动控制提供了力感信息,对实现人机融

合协作具有重要意义。

目前,国内外已经对力矩传感器进行大量的研究,并取得了一定成果。Tsetserukou等<sup>[3]</sup>提出一种关节力矩传感器应用于类人型机械臂上,通过测量在力矩作用下传感器内外圈产生的旋转角度,并根据角位移与力矩的关系,获得关节力矩值。Kawakami等<sup>[4]</sup>基于线性编码器研

收稿日期:2019-11-21 Received Date:2019-11-21

\* 基金项目:国家自然科学基金地区基金(51465005)、广西创新驱动发展专项(桂科 AA18118002,桂科 AA17204017)、广西重点研发计划(桂科 AB16380237)、南宁市重点研发计划(20181018-3,20181018-1)项目资助

制非接触式关节力矩传感器,具有较好的抗电磁干扰能力,且不受温度变化的影响。盖海松等<sup>[5]</sup>提出了一种应变式力矩传感器,在传感器轮辐上粘贴应变片,在力矩作用下轮辐和应变片产生应变,从而使电阻值发生改变,最后把电阻值转换成被测力矩值。张燕君等<sup>[6]</sup>研制的光纤光栅扭矩传感器,将两个光栅对称封装,在扭矩作用下两个光栅的中心波长向不同方向漂移,通过扭矩与中心波长之间的关系获得扭矩值。赵浩<sup>[7]</sup>基于霍尔效应设计出一种扭矩传感器,利用霍尔效应建立恒定磁场,在扭矩作用下,传感器轴产生形变引起霍尔传感器和恒定磁场产生相对位置变化,便获得电信号与扭矩的对应关系。何小辉等<sup>[8]</sup>设计了一种具有滑移结构的低维间耦合的小量程六维传感器,该传感器具有低量程和高分辨率的特点,对常规的十字交叉六维传感器结构进行了改进,实验表明该传感器维间耦合误差为 2%。侯鹏飞等<sup>[9]</sup>利用应变片原理成功研制了一款关节力矩传感器,该力矩传感器具有 4 个变形梁和对应的 4 个限位块。通过限位块的作用可以对传感器本体进行过载保护,其原理是通过检测变形梁的变形从而实现对力矩的测量。德国宇航中心研制了一款基于应变片原理的关节力矩传感器<sup>[10]</sup>,此关节力矩传感器由 4 个变形梁组成,呈轮辐式分布,在每个变形梁上安装两个应变片,分别沿 35° 和 135° 方向放置,当有力矩作用在传感器上时,通过应变片获得传感器信号并输出。周华鹏等<sup>[11]</sup>提出一种电容式压力传感器,利用 RC 振荡器将电容式传感元件的变化调制为时变频率信号,并采用高阶多项式完成频率变化到压力变化的解算,实现对压力的测量。

上述研究中未能针对如何消除传感器倾覆力矩、轴向压和径向压等力耦合效应对传感器所造成的影响展开。为此,本文基于垂直极板电容效应原理和内置十字交叉滚子轴承结构,设计出一种新型电容式力矩传感器。本文设计与六维力传感器所使用的工况不同,六维传感器一般在工业机器人末端使用,而本文设计的单维力传感器适用于工业机器人各关节,其用途有所差异,且电容式较其他电阻式应变片的灵敏度高<sup>[12-13]</sup>,故通过对垂直极板电容效应原理的应用进行分析,提出采用电容双差动测量方式以提高力矩传感器的灵敏度、线性度和稳定性。传感器其自身具有结构解耦特性,可降低对机械加工要求,在安装时无需考虑由于制造和安装误差所造成的力耦合效应的影响,以实现单维力矩的准确检测。

## 1 新型力矩传感器工作和结构原理

### 1.1 垂直极板电容效应工作原理

将电容的静电极和动电极垂直放置,并保持一定电

极间距,在两极板间加载电压,则在两电极之间将产生电场,这种现象称为垂直极板电容效应。

传感器基于垂直极板电容效应原理,以静电极和动电极垂直分布所构成的电容器作为力矩转换元件。当力矩作用在传感器时,与传感器一体的动电极随传感器转动微小的角度,固定在传感器的 PCB 板上的静电极则静止不动,即力矩使电容器的动电极与静电极的电极间距产生变化,从而引起电容量变化。根据电磁场理论,建立电极间距与电容变化量数学关系<sup>[14]</sup>:

$$\Delta C = \frac{4\varepsilon W}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right) \quad (1)$$

式中: $h_0$  为两极板初始电极间距,  $m$ ;  $\Delta h$  为电极间距变化量,  $m$ ;  $W$  为静电极宽度,  $m$ ;  $\varepsilon$  为介电常数;  $\Delta C$  为电容变化量,  $F$ 。

为提高传感器的灵敏度和稳定性,本文采用双差动结构设计。如图 1(a) 所示,每个电容器相隔 90° 均匀分布,每两个对角电容器构成第一对差动式电容转换元件,故电容 1 器与 3, 电容器 2 与 4 构成两对差动式力矩转换元件,两对差动式电容器成轮辐式分布,共同构成双差动的测量方式。

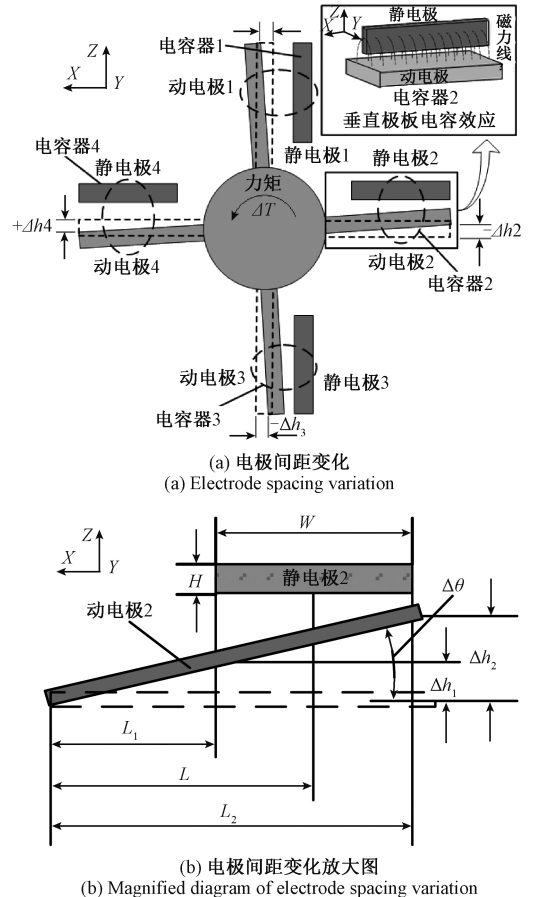


图 1 双差动测量原理  
Fig.1 Double differential measurement principle

当传感器受图 1(a) 所示逆时针方向的力矩  $\Delta T$  时, 电容器 2 的静电极 2 与动电极 2 的间距减小, 电容器 4 的静电极 4 与动电极 4 的电极间距增大。以电容器 2 计算电极间距变化量与力矩值的关系, 如图 1(b) 所示, 设静电极 2 最外端与传感器中心间距为  $L_2$  且电极间距变化为  $\Delta h_2$ , 静电极 2 最内端与传感器中心间距为  $L_1$  且电极间距变化为  $\Delta h_1$ , 传感器内圈相对传感器外圈转角为  $\Delta\theta$ , 并结合式(1)可得:

$$\Delta h_1 = \Delta\theta \cdot L_1 = a\Delta T \cdot L_1 \quad (2)$$

$$\Delta h_2 = \Delta\theta \cdot L_2 = a\Delta T \cdot L_2 \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得电极间距变化的平均值  $\Delta h$ 。

$$\Delta h = a\Delta T \cdot \frac{L_1 + L_2}{2} = a\Delta T \cdot L \quad (4)$$

式中:  $L$  为静电极中心到传感器中心的间距。

根据式(1)的电极间距与电容变化量的数学关系计算得知单个电极电容的变化量  $\Delta C$ , 对式(1)进行泰勒展开, 因极板省略掉二次项, 如式(5)所示。

$$\Delta C = -\frac{4\varepsilon W}{\pi} \ln\left[1 - \frac{\Delta h}{h_0}\right] = -\frac{4\varepsilon W}{\pi} \ln\left[1 - \frac{a\Delta T \cdot L}{h_0}\right] \approx -\frac{4\varepsilon W}{\pi} \cdot \frac{a\Delta T \cdot L}{h_0} \quad (5)$$

依据此原理可分别求出 4 个电极的变化量分别为  $\Delta C_1$ 、 $\Delta C_2$ 、 $\Delta C_3$  和  $\Delta C_4$ , 并对  $\Delta C_3$  和  $\Delta C_1$ 、 $\Delta C_4$  和  $\Delta C_2$  分别作差, 如式(6)所示, 通过作差二对力敏元件的电容变化量, 实现电容差动式传感器电容的计算<sup>[15]</sup>, 从而提高测量的灵敏度, 抵消温度效应对电容值的影响, 第一对差动式力矩转换元件的电容变化量计算结果如下:

$$\Delta C_\alpha = \Delta C_3 - \Delta C_1 \quad (6)$$

式中: 差值  $\Delta C_\alpha$  为第一对差动式力矩转换元件的电容变化量。

同理可得:

$$\Delta C_\beta = \Delta C_2 - \Delta C_4 \quad (7)$$

式中: 差值  $\Delta C_\beta$  为第二对差动式力矩转换元件的电容变化量。

两对差动式力矩转换元件的总电容变化量平均值  $\Delta C_{\text{总}}$ , 以提高测量的可靠性和降低横向力对传感器的影响, 如下:

$$\Delta C_{\text{总}} = \frac{\Delta C_\alpha + \Delta C_\beta}{2} \quad (8)$$

通过对垂直极板电容效应的分析, 分别解析了电容变化的物理原理和数学关系计算过程。

## 1.2 新型力矩传感器结构

新型力矩传感器结构如图 2 所示, 主要包括力矩测量结构部分和解耦结构部分。

### 1) 结构原理

力矩测量结构部分采用从内圈输入力矩, 外圈输出

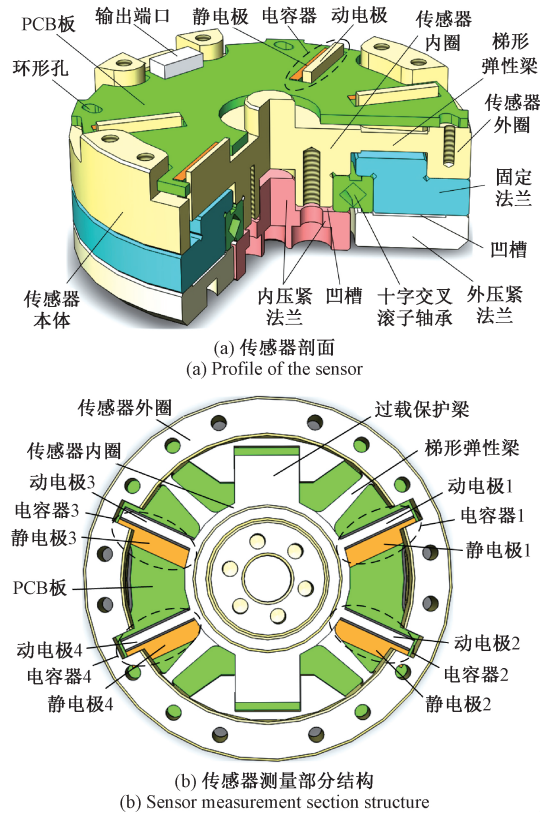


图 2 传感器结构

Fig.2 Sensor structure

力矩的方式。内外圈由呈轮辐式分布的 4 个梯形弹性梁连接, 轮辐式分布方式减小了非待测力矩等对传感器检测准确性的影响, 且梯形弹性梁为近似等强度梁, 能够降低由应力变化不均匀或应力集中引起的机械损伤速度, 使传感器的抗疲劳强度得到提高<sup>[16]</sup>。内圈和外圈之间有一对过载保护梁, 当传感器所受力矩超过量程时起到过载保护作用, 提高传感器使用的安全性。图 2(a) 中 4 个动电极对称分布在内圈上, 而 4 个静电极设置在 PCB 板上, 且 PCB 板通过环形孔固定在传感器外圈上。静电极与对应的动电极平行且保持一定初始电极间距, 共形成 4 个电容器, 作为传感器测量力矩的转换元件, 实现对力矩的测量。

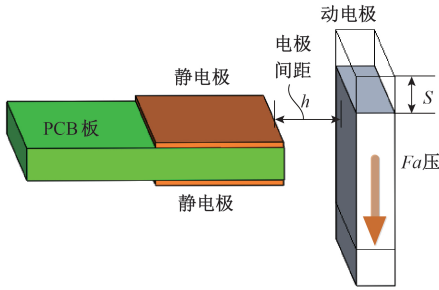
解耦结构部分安装有十字交叉滚子轴承。图 2(a) 中十字交叉滚子轴承安装在传感器内圈上, 轴承外圈通过固定法兰固定在传感器外圈上, 且通过内压紧法兰和外压紧法兰分别把轴承内外圈压紧, 内压紧法兰与传感器内圈以及外压紧法兰与固定法兰之间设有一定间隙的凹槽, 以确保能够压紧轴承的内外圈。当传感器外圈受到倾覆力矩、轴向压力和径向压力等力/力矩作用时, 轴承起到支撑作用, 不需要外界辅助设备便消除了力耦合效应对测量的影响, 避免梯形弹性梁受到非待测力矩作用, 确保由梯形弹性梁变形引起的电极间距变化均由待

测力矩作用的结果,以保证测量的准确性。

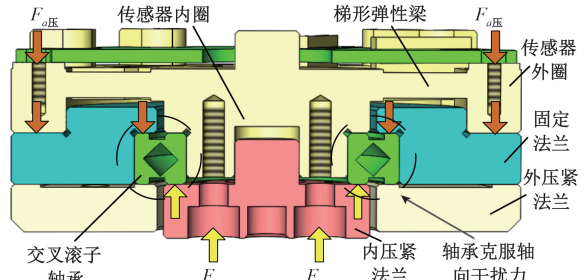
2) 结构解耦原理

倾覆力矩、轴向压力和径向压力等力/力矩对待测力矩的影响及结构解耦原理分析如图 3 所示。图 3(a)中,当传感器在无解耦结构的情况下受轴向压力  $F_{a压}$  时,动电极相对静电极产生轴向位移  $S$ ,引起电容器电容量发

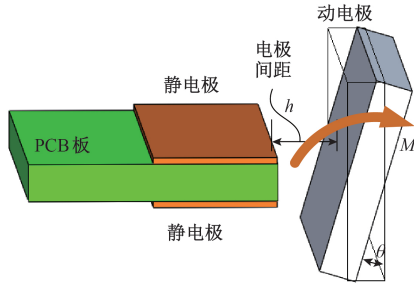
生变化,带来测量误差。通过结构解耦降低力耦合效应原理如图 3(b)所示,轴向压力  $F_{a压}$  通过固定法兰传递到轴承外圈上,内压紧法兰给轴承内圈提供支持力  $F_N$  以平衡外界轴向压力  $F_{a压}$ 。当固定法兰和内压紧法兰的刚度较大时,可以忽略梯形弹性梁产生的轴向弯曲变形,即动电极相对静电极无轴向位移产生,实现轴向解耦功能。



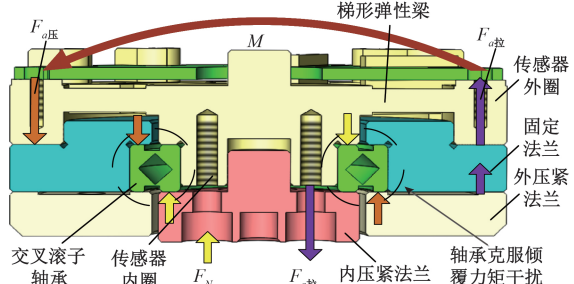
(a) 轴向力影响  
(a) The influence of axial force



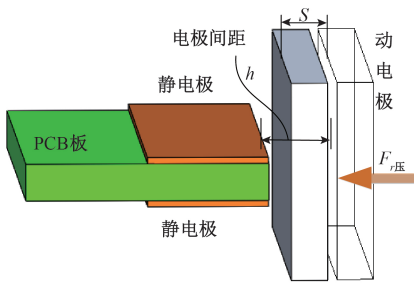
(b) 轴向力解耦原理  
(b) Decoupling principle of axial force



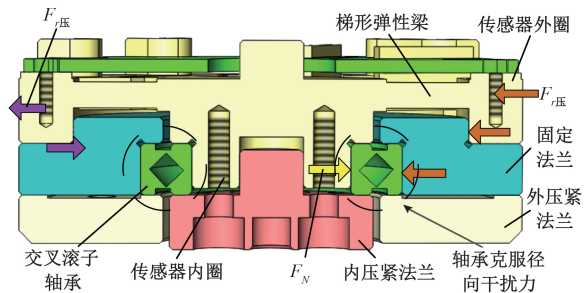
(c) 倾覆力矩影响  
(c) The influence of overturning torque



(d) 倾覆力矩解耦原理  
(d) Decoupling principle of overturning torque



(e) 径向力影响  
(e) The influence of radial force



(f) 径向力解耦原理  
(f) Decoupling principle of radial force

图 3 结构解耦原理

Fig.3 Structure of decoupling principle

如图 3(e)所示,当倾覆力矩  $M$  使动电极相对静电极产生偏转,引起电容量变化而带来测量误差。图 3(d)所示为对倾覆力矩  $M$  进行解耦设计,倾覆力矩  $M$  等效为两种力的作用,即传感器右端受轴向拉力  $F_{a拉}$  作用、传感器左端受轴向压力  $F_{a压}$  作用,右端的轴向拉力  $F_{a拉}$  经过固定法兰和外压紧法兰传递到轴承外圈上,同时传感器内圈支撑轴承内圈以起到平衡作用;左端的轴向压力  $F_{a压}$  平衡原理与图 3(b)相同。通

过解耦结构平衡外界倾覆力矩,实现对倾覆力矩  $M$  的解耦功能。

图 3(e)中径向压力  $F_{r压}$  使动电极相对静电极产生径向位移  $S$ ,引起电容量变化而产生测量误差。图 3(f)中对  $F_{r压}$  进行解耦:当  $F_{r压}$  作用在传感器上,传感器右端处通过固定法兰将  $F_{r压}$  传递到轴承外圈上,同时传感器内圈对轴承内圈起到支撑作用以平衡外界  $F_{r压}$ ,实现对  $F_{r压}$  的解耦功能。

## 2 新型力矩传感器仿真及实验

### 2.1 传感器仿真分析

所设计的传感器的最大量程为  $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 传感器材料选用 2A12 硬铝合金, 其主要性能参数为: 屈服极限  $\sigma_s = 325 \text{ MPa}$ , 弹性模量  $E = 68 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.32$ 。对其进行有限元分析, 验证传感器测量结构部分机械结构的合理性。利用 SolidWorks 建立力矩传感器三维模型, 导入 ANSYS Workbench 中进行有限元分析。图 4(a) 所示为对力矩传感器内圈加载满量程载荷力矩  $10 \text{ N}\cdot\text{m}$  时其应力与应变云图。

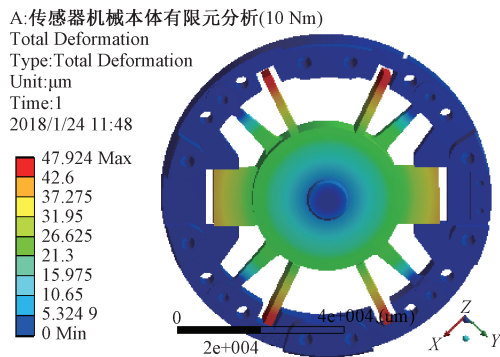
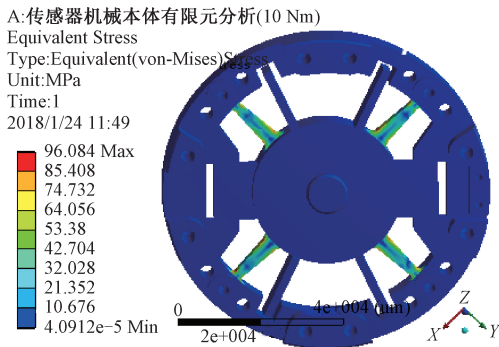


图4 传感器测量结构部分有限元分析

Fig.4 Finite element analysis of sensor measurement structure section

由图 4(b) 有限元分析可知, 对传感器加载量程内最大力矩时, 最大变形量在动电极外端, 为  $4.7924 \times 10^{-2} \text{ mm}$ ; 最大应力在弹性梯形梁上, 为  $96.084 \text{ MPa}$ , 小于屈服极限  $\sigma_s = 325 \text{ MPa}$ , 表明其满足强度设计要求。

为获得传感器内圈转角值与加载力矩值的关系, 通过仿真对传感器施加以  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$  为间隔的等梯度力矩, 分别得到对应转角值, 拟合成直线关系为式(9)。

$$\Delta\theta = a\Delta T \quad (9)$$

式中:  $\Delta T$  为加载力矩值,  $\text{N}\cdot\text{m}$ ;  $\Delta\theta$  为传感器内圈相对传感器外圈的转角值,  $^\circ$ ; 系数  $a = 1.3119 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ / (\text{N}\cdot\text{m})$ 。

### 2.2 力矩传感器标定

新型电容式力矩传感器选用电容数字转换器 AD7147 作为电容采集芯片, 设计 PCB 板。对机械结构加工及硬件电路制板并装配, 如图 5 所示。

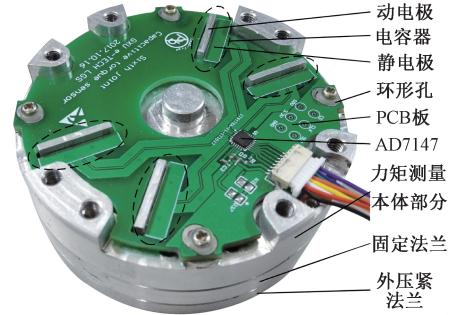


图5 传感器实物

Fig.5 The sensor

传感器实际应用时, 电极间距误差、机械本体制造误差以及外界因素等对输出电容值会造成一定影响, 与式(1)计算出的理论值将有一定偏差, 因此通过图 6 所示传感器实验平台对传感器进行输入输出特性的标定。该平台主要由新型电容式力矩传感器、传感器电容数据采集模块、SL07 型转矩转速传感器(作为标准力矩仪, 其量程为  $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 准确度为 0.2 级)、加载单元及连接模块组成。

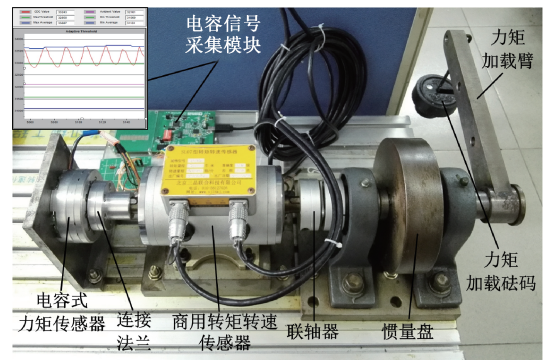


图6 传感器标定实验平台

Fig.6 Sensor calibration experiment platform

以顺时针对传感器从空载开始加载以  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$  为梯度的力矩, 并分别测量出非差动、第一对差动和第二对差动的电容值; 以同样梯度加载方式和测量方式进行逆时针方向的测量实验。以上重复 3 次求平均值, 如表 1 所示, 设顺时针为力矩正方向, 双差动电容变化量为第一对差动电容变化量与第二对差动电容变化量的平均值。采用最小二乘法拟合数据, 通过 MATLAB 得到传感器的静态特性曲线如图 7 所示。

表 1 传感器标定数据  
Table 1 Sensor calibration data

pF

电容变化量	顺时针施加力矩值/(N·m)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
非差动电容变化量	0	-63.0	-118.5	-173.0	-227.5	-277.5	-328.0	-375.5	-428.0
第一对差动电容变化量	0	-103.0	-203.5	-304.0	-405.0	-506.0	-606.0	-706.0	-806.5
第二对差动电容变化量	0	-113.5	-226.5	-340.0	-455.0	-569.5	-685.5	-800.5	-917.5
双差动电容变化量	0	-108.3	-215.0	-322.0	-430.0	-537.8	-645.8	-753.3	-862.0
电容变化量	逆时针施加力矩值/(N·m)								
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
非差动电容变化量	556.0	480.5	405.0	336.0	265.0	194.5	130.0	64.5.0	0
第一对差动电容变化量	864.5	753.5	641.0	531.5	423.0	315.0	207.5	101.5	0
第二对差动电容变化量	955.5	833.0	709.0	589.5	468.5	349.0	232.0	112.5	0
双差动电容变化量	910.0	793.3	675.0	560.5	445.8	332.0	219.8	107.0	0

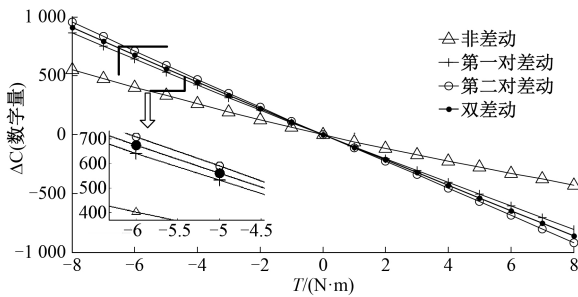


图 7 传感器输出特性直线

Fig.7 Sensor output characteristic linear curve

由表 1 可得力矩传感器的静态特性,第一对差动、第二对差动和双差动的输入输出特性直线分别为  $\Delta C_1 = -104T + 11.62$ ,  $\Delta C_2 = -116.4T + 8.294$ ,  $\Delta C = -110.2T + 9.956$ ; 利用表 1 数据与输出特性直线,传感器线性度即传感器校准曲线与拟合直线间最大偏差 ( $\Delta Y_{max}$ ) 与满量程输出 ( $Y$ ) 的百分比,分别为 1.25%, 0.85%, 1.04%;为了观察传感器的分辨率,以 0.01 N·m 为梯度加载力矩,观察电容变化量和力矩之间的变化关系,实验表明当变化梯度为 0.05 N·m 时,传感器电容输出数字量有 2 个数字量波动范围,有明显的线性关系,则最终实验可得分辨率分别为 0.05 N·m;最大测量误差即同一力矩作用下的测量值之间的最大偏差 ( $\Delta Y_{1max}$ ) 与满量程输出 ( $Y$ ),分别为 2.48%、1.70%、2.07%。从图 7 中拟合的线性直线斜率可以看出差动式测量方式的灵敏度高于非差动式,双差动式测量方式的灵敏度介于两对差动式之间。以上分析得知所设计双差动电容式力矩传感器能够从结构和原理方面降低某个方向上的偶然误差影响,从而提高测量的准确

性、稳定性和可靠性,具有线性度好、测量误差小和分辨率高等特点。

利用所开发的新型力矩传感器对力矩进行实际测量,结果如图 8 所示,表明新型力矩传感器实测曲线能够与 SL07 型转矩转速传感器实测曲线较好的吻合。

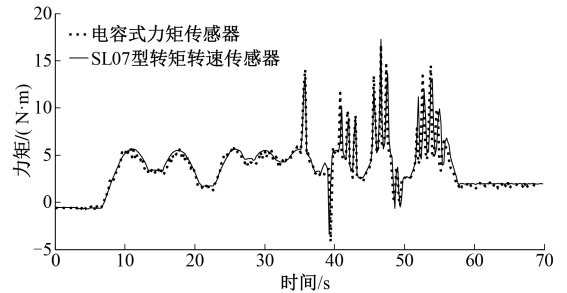


图 8 电容式力矩传感器时域响应

Fig.8 Time-domain response of the capacitive type torque sensor

### 2.3 力矩传感器解耦验证实验

如图 9 所示,搭建模拟机器人第六关节工作状态的实验平台,验证新型力矩传感器的解耦功能。采取 2.2 节中标定的加载方式对传感器施加倾覆力矩、轴向压力和径向压力等力;同时以 1 N·m 为梯度从空载开始加载待测力矩。对无干扰力/力矩和有干扰力/力矩作用时的数据拟合曲线如图 10 所示,实际力矩与所测量结果的差值曲线如图 11 所示。计算得第一对差动、第二对差动和双差动的线性度分别为 -0.41%, 1.97%, 0.33%。这是因为双差动结构降低干扰力/力矩对单个方向造成的较大影响,提高传感器的整体稳定性和可靠性。实验可知干扰力/力矩对测量值影响较小,证明所设计传感器具有良好的抗干扰能力。

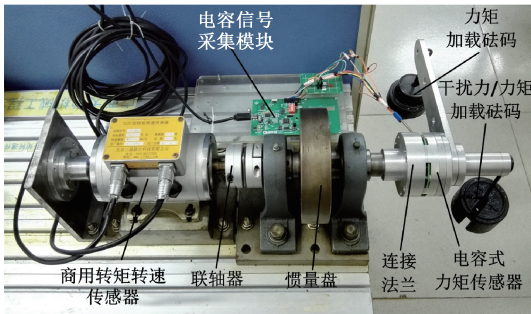


图9 力矩传感器解耦验证实验平台

Fig.9 The experiment platform for torque sensor decoupling verification

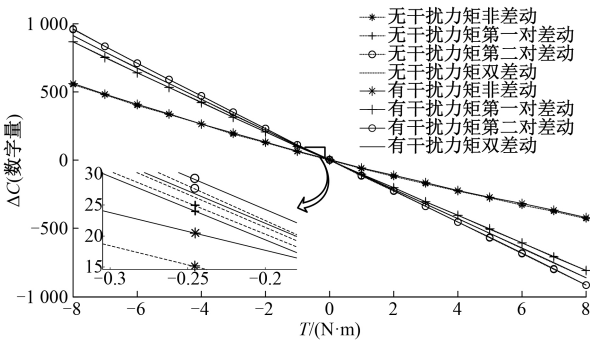


图10 传感器抗干扰能力特性曲线

Fig.10 Anti-jamming capability curve of the sensor

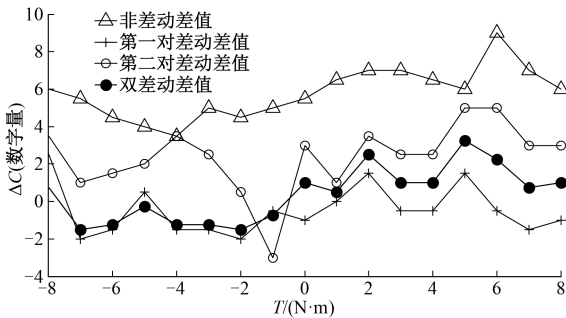


图11 传感器抗干扰差值曲线

Fig.11 Sensor anti-jamming difference curve

### 3 结 论

本文采用有限元对设计出的新型电容式力矩传感器进行分析,并通过实验测试得出以下结论:

1) 采用垂直极板电容效应原理,通过力矩的作用使电容器电极间距产生变化,从而引起电容量变化,测量电容变化量获得力矩值,实现对力矩的测量,证明所开发的新型电容式力矩传感器具有灵敏度高、线性度好、测量误

差小和分辨率高等特点。

2) 采用内置十字交叉滚子轴承的结构设计传感器,有效实现传感器的解耦功能,无需考虑倾覆力矩、轴向压力和径向压力等力/力矩的影响。

3) 采用双差动测量方式测量电容变化量,不仅提高了电容式力矩传感器的测量精度,而且降低因测量过程中偶然误差所带来的影响,提高传感器的稳定性和可靠性。本文设计对电容式力矩传感器的线性度为 1.04%,分辨率为 0.05 N·m,最大测量误差为 2.07%。

### 参考文献

- [1] 侯澈,王争,赵忆文,等. 面向直接示教的机器人负载自适应零力控制[J]. 机器人, 2017, 39(4): 439-448. HOU CH, WANG ZH, ZHAO Y W, et al. Load adaptive force-free control for the direct teaching of robots [J]. Robot, 2017, 39(4): 439-448.
- [2] 何玉庆,赵忆文,韩建达,等. 与人共融——机器人技术发展的新趋势[J]. 机器人产业, 2015(5): 74-80. HE Y Q, ZHAO Y W, HAN J D, et al. Communion with people-The new trend of the development of robot technology[J]. Robot Industry, 2015(5): 74-80.
- [3] TSETSERUKOU D, TADAKUMA R, KAJIMOTO H, et al. Towards safe human-robot interaction: joint impedance control of a new teleoperated robot arm [C]. IEEE International Symposium on Robot & Human Interactive Communication, 2007: 860-865.
- [4] KAWAKAMI T, AYUASAWA K, KAMINAGA H, et al. High-fidelity joint drive system by torque feedback control using high precision linear encoder [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 3904-3909.
- [5] 盖海松,徐方,贾凯,等. 一种机器人关节扭矩传感器的设计与研究[J]. 现代制造工程, 2017(5): 33-37. GAI H S, XU F, JIA K, et al. Design and research of a robot joint torque sensor [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(5): 33-37.
- [6] 张燕君,张亦男,付兴虎,等. 可调量程的轮辐式光纤光栅扭矩传感器[J]. 光电工程, 2017, 44(8): 791-797,842. ZHANG Y J, ZHANG Y N, FU X H, et al. Fiber Bragg grating torque sensor with the adjustable range spoke structure [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(8): 791-797,842.
- [7] 赵浩. 一种基于霍尔效应的扭矩传感器[J]. 传感技术学报, 2016, 29(10): 1505-1508. ZHAO H. A new torque sensor based on hall effect [J]. Journal of Transduction Technology, 2016, 29(10): 1505-1508.

- [ 8 ] 何小辉,蔡萍.一种小量程六维力传感器的设计与分析[J].传感器与微系统,2012,31(1):20-22,25.  
HE X H, CAI P. Design and analysis of a small-scale six-dimensional force sensor [ J ]. Sensors and Microsystems, 2012,31(1):20-22,25.
- [ 9 ] 侯鹏飞,刘伊威,谢宗武.空间机械臂关节力矩传感器的研制[J].机械与电子,2015(7):77-80.  
HOU P F, LIU Y W, XIE Z W. Development of joint torque sensor for space manipulator [ J ]. Machinery and Electronics, 2015(7):77-80.
- [ 10 ] ALBU-SCHAEFFER A. Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight [ J ]. Proc. IEEE Int. conf. of Robotics & Automation Washington Dc, 2002: 5-9.
- [ 11 ] 周华鹏,毛建国,顾筠,等.高精度电容式压力传感器测量方法[J].传感器与微系统,2010,29(2):104-107.  
ZHOU H P, MAO J G, GU J, et al. Measurement method of high-precision capacitive pressure sensor [ J ]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(2): 104-107.
- [ 12 ] 韩康,陈立恒,李行,等.高灵敏度大量程六维力传感器设计[J].仪器仪表学报,2019,40(9):61-69.  
HAN K, CHEN L H, LI H, et al. Design of a six-axis force sensor with large range and high sensitivity [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 61-69.
- [ 13 ] 陈望隆,杨述焱,胡权,等.面向运动力学测量的无线六维力传感器[J].仪器仪表学报,2019,40(4):129-136.  
CHEN W L, YANG SH Y, HU Q, et al. Wireless six-dimensional force sensor for motion mechanics measurement [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 129-136.
- [ 14 ] 李欣欣,李均.一种新型的电容传感器——基于边缘效应原理的传感器[J].光学精密工程,1994,2(1):49-53.  
LI X X, LI J. A new type of capacitance sensor—sensor

based on the principle of edge effect [ J ]. Optics and Precision Engineering, 1994, 2(1): 49-53.

- [ 15 ] 王小鑫.差动电容式加速度传感器测量系统的研究与应用[D].西安:西安科技大学,2012.  
WANG X X. Research and application of the differential capacitive accelerometer measurement system [ D ]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [ 16 ] 单辉祖.材料力学[M].北京:高等教育出版,1999.  
SHAN H Z. Mechanics of materials [ M ]. Beijing: Higher Education Press, 1999.

## 作者简介



蒲明辉,1987年于清华大学获得学士学位,2005年于广西大学获得硕士学位,现为广西大学教授、硕士研究生导师,主要研究方向为传感器技术、机器人控制技术、CAD/CAM/CAE、虚拟样机技术等。  
E-mail:minghui@gxu.edu.cn

**Pu Minghui** received his B. Sc. degree in 1987 from Tsinghua University, and received his M. Sc. degree in 2005 from Guangxi University. Now, he is a professor and master student supervisor at Guangxi University. His main research interests include sensor technology, robot control technology, CAD/CAM/CAE, virtual prototype technology and etc.



潘海鸿(通信作者),分别在1986年和1991年于广西大学获得学士学位和硕士学位,2007年于华中科技大学获得博士学位,现为广西大学教授、博士生导师,主要研究方向为机器人控制技术、高速高精度运动控制、数控技术、嵌入式控制系统和伺服驱动技术。

E-mail:hustphh@163.com

**Pan Haihong** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Guangxi University in 1986 and 1991, respectively, received his Ph. D. degree in 2007 from Huazhong University of Science and Technology. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Guangxi University, his main research interests include robot control technology, high speed and high precision motion control, numerical control technology, embedded control system and servo drive technology.