

文章编号 1004-924X(2024)12-1857-11

谐波减速器转矩原位测量及误差补偿

高海龙, 沈文强, 杜志杰, 曹嘉鋈, 王晓东, 娄志峰*
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为实现协作机器人精准力控,利用谐波减速器柔轮变形研制了一种原位集成转矩传感器。提出了基于傅里叶级数模型的剩余纹波补偿方法提高测量精度。提出了基于傅里叶级数模型的剩余纹波补偿方法提高测量精度。首先,分析了柔轮底部应变规律,通过正弦叠加的原理设计了应变敏感栅结构;然后建立纹波与波发生器角度之间的傅里叶级数模型,补偿剩余纹波;最后,研制了测试平台进行加载测试,结果表明,在波发生器静止状态下施加瞬时激励和阶跃负载,自制转矩传感器与标准转矩传感器输出误差为 0.988% 和 0.253%;在波发生器旋转状态下施加阶梯变化、正弦变化、正弦变化过程中人为碰撞三种形式的负载,自制转矩传感器与标准转矩传感器输出误差为 3.822%, 4.247% 和 4.456%。本文提出的补偿方法能有效降低剩余纹波对传感器输出的干扰,有利于推动关节转矩精准测量的实现。

关键词:转矩传感器;谐波减速器;傅里叶级数;误差补偿

中图分类号:TP242;TH823 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243212.1857

Development of integrated torque sensor for harmonic reducer and Error Compensation

GAO Hailong, SHEN Wenqiang, DU Zhijie, CAO Jiajun, WANG Xiaodong, LOU Zhifeng*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: louzf@dlut.edu.cn

Abstract: In order to achieve precise force control of collaborative robot, an in-situ integrated torque sensor is developed by using the deformation of the flexspline of the harmonic reducer. Proposed a residual ripples compensation method based on Fourier series model to improve measurement accuracy. Firstly, the strain law at the bottom of the flexspline was analyzed, and the sensitive grid structure of the strain gauge was designed based on the principle of sinusoidal superposition; Then the Fourier series model between the remain ripples and the angle of the wave generator was established to compensate the residual ripple; Finally, a test platform is developed for loading test, the results show that the output errors of the self-made torque sensor and the standard torque sensor are 0.988% and 0.253% when the instantaneous excitation and step load are applied under the static state of the wave generator; Under the rotating state of the wave generator, three kinds of loads, i. e. step change, sinusoidal change and man-made collision in the process of sinusoidal change, are applied. The output errors between the self-made torque sensor and the standard torque sensor are 3.822%, 4.247% and 4.456%. The compensation method proposed in this paper can effectively reduce the interference of residual ripple on the sensor output, which is conducive to

收稿日期:2024-03-09;修订日期:2024-04-11.

基金项目:国家重点研发计划 (No. 2023YFB4704301);辽宁省“兴辽英才计划”项目 (No. XLYC2002020)

the realization of accurate measurement of joint torque.

Key words: torque sensor; harmonic reducer; Fourier series; error compensation

1 引言

协作机器人具有轻量化、灵活性强、人机协同能力强等特点,在未来的工业制造、医疗手术、家庭服务等领域均有着广阔的前景^[1-2]。安全性能与力控性能是协作机器人不可忽视的重要特性,通过获得机械臂与外界的交互力是实现力控制的重要方法,目前获取外力的方法有基于关节电机电流测量法、在关节内加装剪切梁式转矩传感器测量法,在机器人末端安装多维力传感器测量法等^[3-5]。其中,基于关节电机电流测量法测量精度较低,容易受电机参数等因素的影响;剪切梁式转矩传感器需要额外弹性体,这会对关节结构产生影响;六维力传感器由于其复杂的结构导致成本较高。

协作机器人关节内谐波减速器的柔轮是一薄壁件,在受到外力作用时能够产生较大变形^[6-7]。装有谐波减速器的机器人关节可以通过利用柔轮受力变形来实现对转矩的测量,这种方法相当于将转矩传感器直接嵌入到机器人关节中,不需要增加额外的弹性体,简化了关节结构,保证了关节刚度^[8]。

引起柔轮产生变形的因素除了负载转矩外还有波发生器的挤压,在谐波减速器工作时波发生器的旋转导致柔轮底部应变呈正(余)弦曲线的规律变化,从而无法测量到准确的转矩信号,这给转矩的测量带来挑战。Hashimoto 等人采用四组间隔 90°应变片产生的信号叠加的方法消除纹波干扰,制作出具有良好动态响应的机器人关节转矩传感器^[9]。Taghirad 等人采用精确定位的方法使用对称分布的四个直角应变花来减小波发生器转动对传感器信号的影响,并采用了卡尔曼滤波估计的方法提高传感器精度^[10-11]。Godler 等人将纹波信号假设为多个不同频率分量的叠加,通过调节四个对称分布的应变花的灵敏度来对各个应变花的输出信号进行增益调节,并由此来减小应变片安装误差的影响^[12-14]。Jung 等人采用了基于顺序跟踪的滤波算法来补偿转矩脉动,研制了一个具有固定截止范围的陷波滤波器从

原始应变信号中滤除转矩纹波,保证了不同转速条件下的连续转矩测量^[15]。潘新安等人通过矢量叠加的方法消除纹波信号,设计了基于三矢量抵消的转矩传感器实现多阶纹波信号的消除,并通过使用冗余应变片提高转矩传感器精度^[16]。

本文通过在柔轮底部粘贴自制的一种环形应变片进行谐波减速器转矩测量。针对波发生器旋转造成的剩余纹波干扰,提出了建立剩余纹波与波发生器角度间的傅里叶级数模型对测试信号进行补偿的方法,在无需对测试信号进行滤波处理的条件下提高了信号的准确度,避免了信号的延迟,保证了传感器的响应速度。研制了扭计传感器样机并通过测试平台完成了传感器样机的性能测试。

2 谐波减速器嵌入式转矩测量方法

柔轮(40CrNiMoA)为一种薄壁结构,相对于其他部件在受到转矩作用时能够产生较大的弹性变形,可用作关节转矩测量的弹性体。受工作条件影响,柔轮筒壁长期处在大量油污环境中,若在筒壁粘贴应变片,应变片寿命不可避免地会受到影响,相比之下柔轮底部能提供更好的测量环境,并且平面更便于粘贴应变片。本文采用在柔轮底部粘贴应变片的转矩测量方案,如图 1 所示,通过搭建惠斯通电桥电路将转矩在柔轮底部产生的应变信号转化为电信号进行采集,最终获取转矩信息。

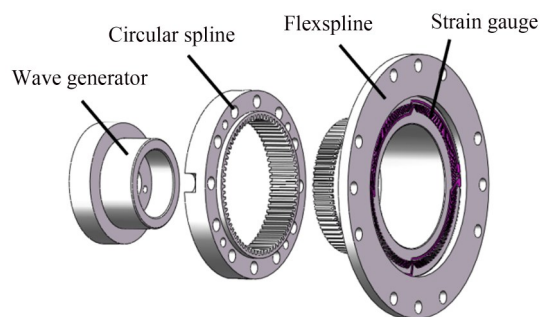


图 1 应变片粘贴位置

Fig. 1 Bonding position of strain gauge

谐波减速器传递负载时,柔轮前端与刚轮啮合处受到转矩作用使柔轮产生变形,这一变形会沿筒壁传递到柔轮底部(转矩信号),同时波发生器作用下强制柔轮变形同样也会传递到底部(纹波信号)。因此,在谐波减速器工作过程中,柔轮

底部会产生负载转矩和波发生器作用下的两种变形,导致转矩信号混杂在波发生器旋转产生的正弦规律波动中而无法准确测量,为了解决这一问题,本文采用研制的如图 2 所示的敏感栅结构,通过正弦叠加的方法消除纹波信号,原理如下:

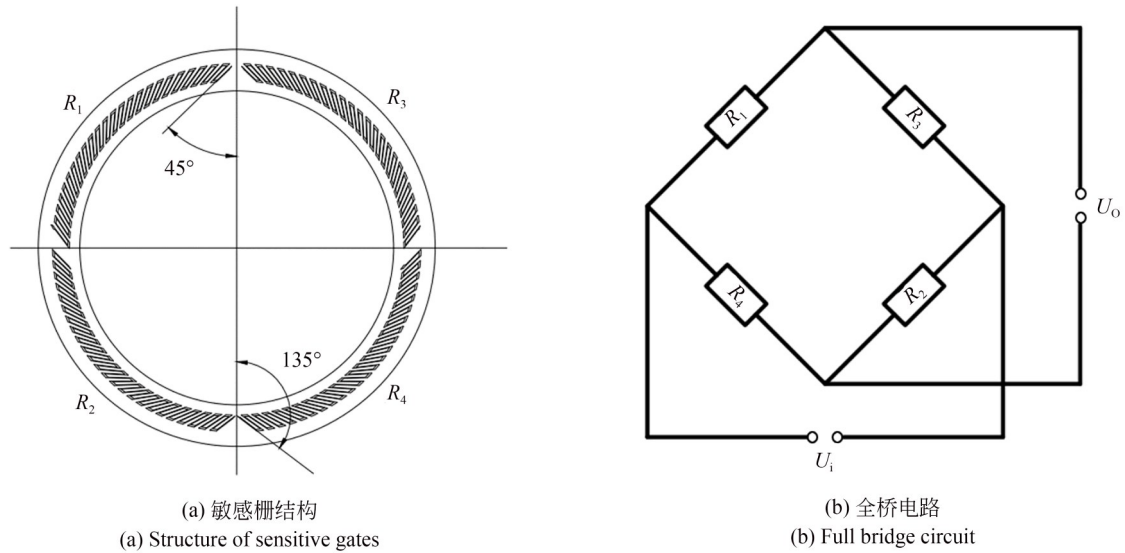


图 2 敏感栅结构及惠斯通全桥电路

Fig. 2 Structure of sensitive gates and Wheatstone full bridge circuit

敏感栅 R_1, R_4 处在同一半径下,角度分别为 45° 和 135° (柔轮底面在转矩作用下的主应力方向),如图 1 所示,当谐波减速器受到负载作用时,敏感栅 R_1 和 R_4 分别呈拉伸状态和压缩状态,波发生器的作用会在柔轮底部的圆周上产生正弦规律的应变,并且以 180° 为一个周期,此时在负载转矩和波发生器共同作用下 R_1 和 R_4 测得的应变信号分别为:

$$\begin{cases} e_1 = \alpha_1 + \beta_1 \sin(2\pi nt) \\ e_2 = \alpha_2 + \beta_2 \sin(2\pi nt + 2\pi) \end{cases} \quad (1)$$

其中: α 为负载转矩引起的应变, β 为纹波信号的

幅值, n 为波发生器转速, t 为时间参数。由于 R_1 和 R_2 位置相差 180° , 并且分布在同一半径, 因此有如式 (2) 所示的关系:

$$\begin{cases} \alpha_1 = -\alpha_2 \\ \beta_1 = \beta_2 \end{cases} \quad (2)$$

此时两应变信号的常数分量数值相等, 正弦分量完全相同, 将两个信号相减即可消除正弦分量, 得到只有转矩作用下的应变值 $2\alpha_1$ 。

分别在与敏感栅 R_1, R_4 间隔 90° 的位置处布置一组敏感栅 R_2, R_3 , 搭建如图 2 所示的惠斯通全桥电路, 可得电桥输出电压为:

$$U_{out} = \frac{(R_1 - \Delta R_1)(R_3 - \Delta R_3) - (R_2 - \Delta R_2)(R_4 - \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_3 + \Delta R_3)(R_2 + \Delta R_2 + R_4 + \Delta R_4)} U_i \approx \frac{1}{4} U_i \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3)$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 时, 有:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_2}{R_2} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{\Delta R'}{R'} \quad (4)$$

代入式 (3) 可得此时电桥输出电压为:

$$U_o = \frac{\Delta R'}{R'} U_i = K \epsilon_d U_i = 4K \epsilon_i U_i, \quad (5)$$

其中: K 为灵敏系数, ϵ_d 为敏感栅的应变, ϵ_i 为转矩引起的应变, 其中:

$$\epsilon_i = \frac{T}{4\pi t G r^2} \quad (6)$$

把式 (6) 代入式 (5), 可得桥路输出电压与转

矩之间的关系为:

$$U_o = \frac{KU_i}{\pi tGr^2} T. \quad (7)$$

3 传感器信号补偿

由于存在位置误差,这导致敏感栅测得的波纹信号的幅值及相位并不相等和相差 180° ,测量信号在叠加时由于存在误差而产生剩余纹波,此时仍无法准确获取转矩信息,如图 3 所示。

可以看出,由于剩余纹波的干扰,此时传感器输出与实际值之间存在 $\pm 2.409 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的误差,这对传感器测量结果造成了很大影响。针对这一问题,本文提出了运用傅里叶级数拟合出剩余纹波与波发生器角度之间的关系模型来对传感器输出进行补偿的方法。

剩余纹波是与波发生器旋转角度相关的周期信号,并且以 180° 为一个周期,有明显的正弦规律,傅里叶级数可以通过不同阶次的谐波叠加拟合正弦波形^[17],可以用来建立剩余纹波模型。

传感器输出的补偿流程如图 4 所示,利用傅里叶级数拟合得到剩余纹波的模型 y' ,计算方法

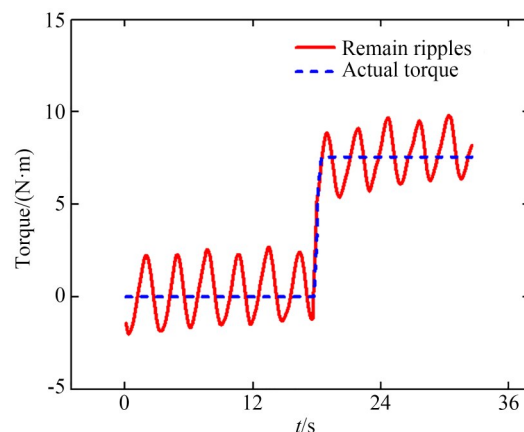


图 3 剩余纹波

Fig. 3 Remain ripples

如式(8)所示:

$$y' = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(i\omega\alpha) + b_i \sin(i\omega\alpha), \quad (8)$$

其中: a_i , b_i 和 ω 为傅里叶级数系数, α 为波发生器角度。在测试之前首先要对传感器输出与波发生器角度进行标定,得到剩余纹波傅里叶级数模型的各项系数,测试过程中利用波发生器角度信息 α 计算出需要补偿的电压信号 y' ,对传感器输出 y 进行修正。

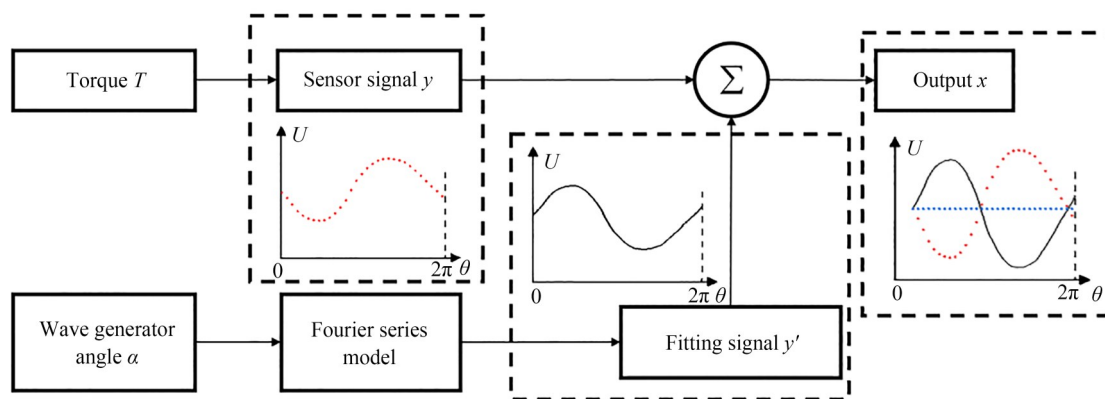


图 4 传感器信号补偿流程

Fig. 4 Process of sensor signal compensation

图 5 为分别使用一阶、二阶、三阶傅里叶级数拟合曲线得到的结果。可以看出一阶傅里叶级数拟合后的曲线与测试数据吻合度较低,二阶和三阶傅里叶级数拟合模型的 R^2 均大于 0.999,考虑在线计算的快速性,本文采用二阶傅里叶级数拟合剩余纹波信号。

信号的补偿效果如图 6 所示,测试信号的波动由补偿前的 $\pm 17.769 \text{ mV}$ 减小为 $\pm 3.706 \text{ mV}$;对信号进行频域分析得到信号频谱图如图 7 所示,测试信号中最大频率分量的幅值由 14.999 减小为 2.554。以上结果表明,传感器输出信号中的剩余纹波干扰在加入补偿后得到了明显的抑制。

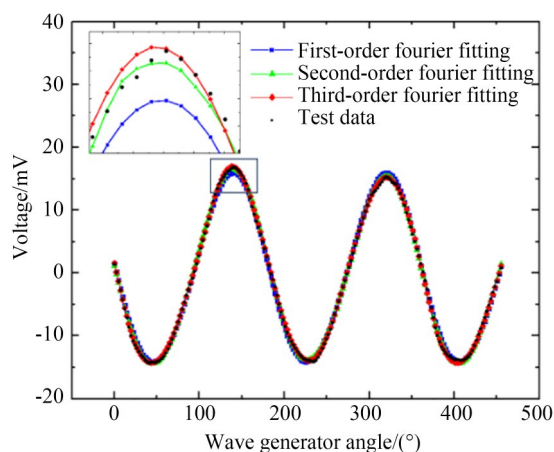


图5 不同阶数下傅里叶级数拟合结果

Fig. 5 Fourier series fitting results under different orders

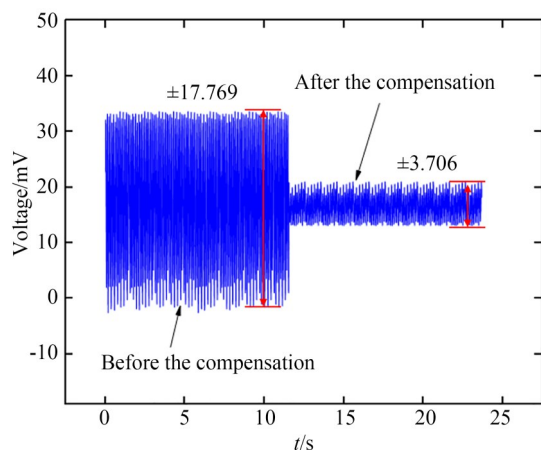


图6 传感器信号补偿效果

Fig. 6 Effect of sensor signal compensation

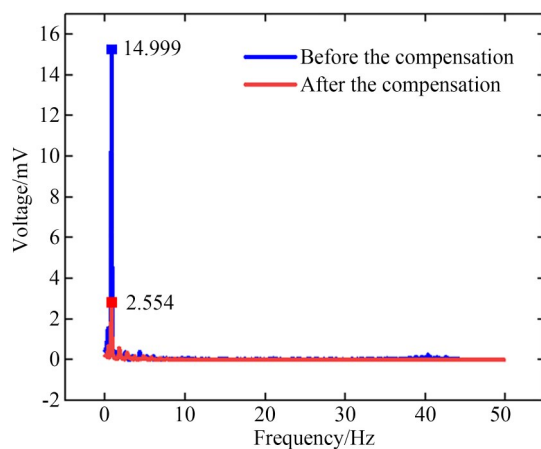


图7 信号频率分析

Fig. 7 Frequency analysis of signal

4 传感器实验测试

4.1 传感器样机研制

由于敏感栅覆盖了柔轮底部的较大区域,因此在确定其分布位置时应使其覆盖的柔轮底部应变变化规律保持一致,每个敏感栅测量到的信号具有一致性,有利于信号叠加。

为了确定敏感栅布置位置,利用ANSYS软件对谐波减速器工作过程中柔轮底部产生的应变进行有限元分析,在波发生器转动过程中柔轮底部的应变云图如图8所示。

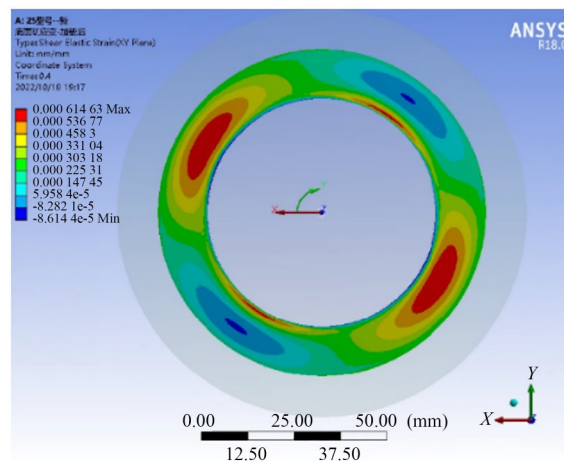


图8 柔轮底部应变云图

Fig. 8 Contour map of strain simulation at the bottom of the flexspline

通过仿真云图可以看出,在波发生器的长轴处和短轴位置分别对应柔轮底部最大和最小应变值,在最外圈和最内圈位置,圆周方向的应变出现不规则的现象,这与柔轮齿端到底部复杂的力传递过程有关。应变值大小从最外圈和最内圈向中间位置呈梯度变化趋势,在中间圆周位置有一部分区域的应变值相近。

沿柔轮径向提取不同直径下周向的应变数据,得出36~48 mm内每隔2 mm直径下的周向应变变化曲线如图9所示,可以看出,在圆周方向应变呈正弦规律变化,以180°为一个周期。不同半径下的变化规律不一致,在36 mm和42 mm直径下的应变值明显小于其他半径下的应变值,在38~42 mm直径范围内应变值差异较小,因此敏感栅布置在38~42 mm直径范围内有利于获取更好的测试信号。

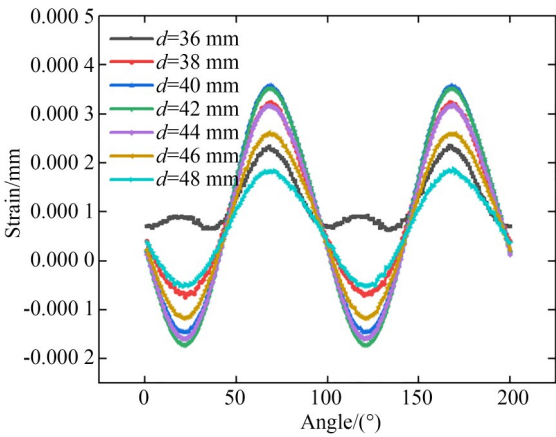


图9 不同半径下应变曲线

Fig. 9 Strain variation curve under different radius

按照设计的敏感栅结构制作环形应变片,应变片相关各个参数如表 1 所示。

表 1 应变片参数

Tab. 1 Parameters of strain gauges

参数名称	参数值
基底材料	改性酚醛树脂
敏感栅材料	康铜合金
敏感栅外径/mm	41
敏感栅内径/mm	38
应变片外径/mm	46
应变片内径/mm	36
敏感栅电阻值/ Ω	200

在粘贴应变片时,先将柔轮底面清洗干净,然后使用图 10 所示的平台进行涂胶,为了保证出胶的均匀性和稳定性,保持针头固定并匀速出胶,同时控制精密转台匀速转动,将胶剂均匀涂抹在柔轮底部。

使用热释放胶拾取并放置应变片,通过放置砝码施加压力,然后进行加温操作,此过程可以固化胶粘剂,同时使热释放胶黏性消除,方便取下。最终制作的转矩传感器样机如图 11 所示。

4.2 转矩测试实验系统

本文使用图 12 所示的实验系统来对自制传感器进行加载测试。使用三菱 HG-SR102J 伺服电机提供动力,使用磁粉制动器提供负载转矩,可以通过调节控制器输出 0~24 V 的电压线性控

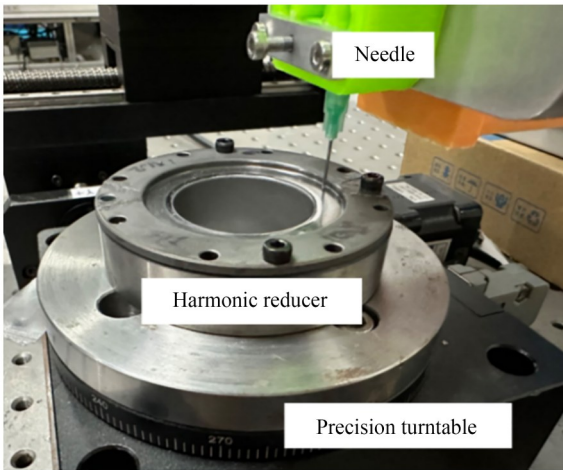


图 10 柔轮底面涂胶

Fig. 10 Apply glue on the bottom surface of the flexspline

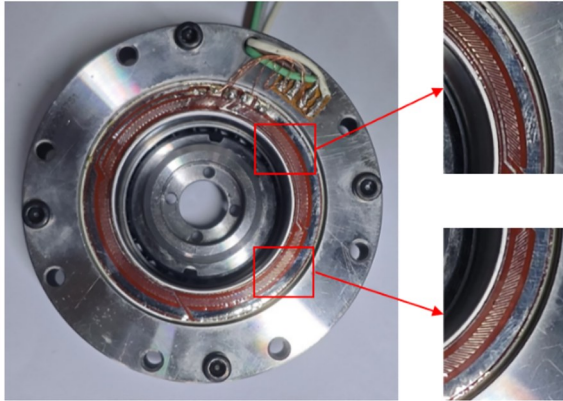


图 11 转矩传感器样机

Fig. 11 Prototype of the torque sensor

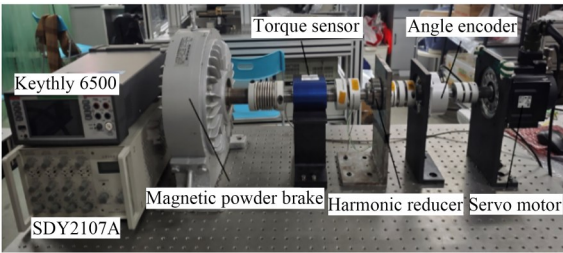


图 12 转矩测试系统

Fig. 12 Torque testing system

制转矩大小。在电机与谐波减速器之间通过连接角度编码器(Heidenhain RCN2310)来获取波发生器角度信息。谐波减速器与连杆之间连接高精度动态转矩传感器(Messtechnik 0261Due, 精度 $\pm 0.1\%$ F.S., 最大转速 15 000 rpm, 重复性精度 $\pm 0.2\%$ F.S.), 可将其测量值作为标准转矩

来与自制传感器输出进行对照。

应变仪(SDY2107A)为应变片提供桥路,由于柔轮底部受外力作用下产生的应变十分微小,电桥电路输出电压信号通常是很微弱的,这个微弱输出电压通常难以直接用于后续计算,因此需要通过合理的调理电路,将微弱电信号进行放大和滤波,并将模拟量转矩信号转化为数字量信号,从而实现了对转矩信号的读取。应变仪内部可以调节桥压,并且内置放大电路,可以对电桥信号进行调节,本文使用4 V桥压和100倍增益来放大电压信号。数据采集使用Keithley6500数字万用表,采样率为1 000 Hz,通过RS232端口与计算机进行数据传输。

4.3 转矩传感器标定与性能测试

使用搭建的测试系统对传感器进行标定与性能测试。在标定过程保持波发生器静止,输出端使用连杆代替磁粉制动器,通过在连杆一端悬挂砝码来施加负载转矩,通过标准转矩传感器测试施加的转矩真值。传感器的主要性能指标包括线性度、灵敏度、迟滞、重复性。

4.3.1 线性度

传感器的线性度是指传感器输入—输出校准曲线与理想直线的偏离程度,自制转矩传感器标定得到的转矩-电压数据如图13所示。

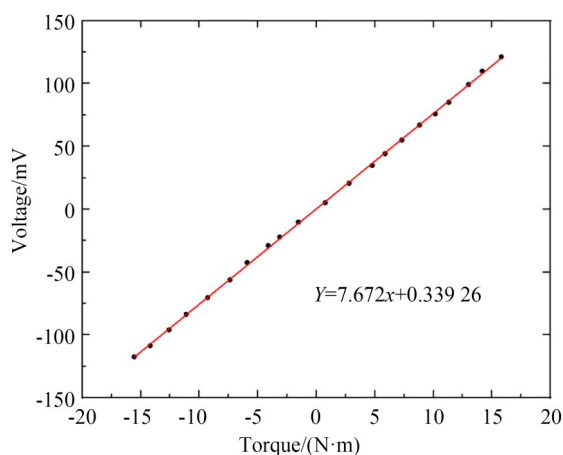


图13 标定曲线

Fig. 13 Calibration curve

实验数据与直线偏差的最大值为0.936mV,因此得到自制传感器的非线性误差为:

$$e_L = \frac{0.936 \text{ mV}}{121.242 \text{ mV}} \times 100\% = 0.772\%. \quad (9)$$

4.3.2 灵敏度

负载转矩从0 N·m增大到15.803 N·m时,传感器输出电压变化了121.242 mV,因此得到自制传感器的灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{121.242}{15.803} = 7.672 \text{ mV/N} \cdot \text{m}. \quad (10)$$

4.3.3 迟滞

传感器的迟滞指的是加载和卸载过程中,同一输入下传感器的输出不一致的现象。在加载和卸载过程中传感器输出最大差值为1.392 mV,如图14所示,求得传感器迟滞误差为:

$$e_H = \frac{1.392}{121.242} \times 100\% = 1.148\%. \quad (11)$$

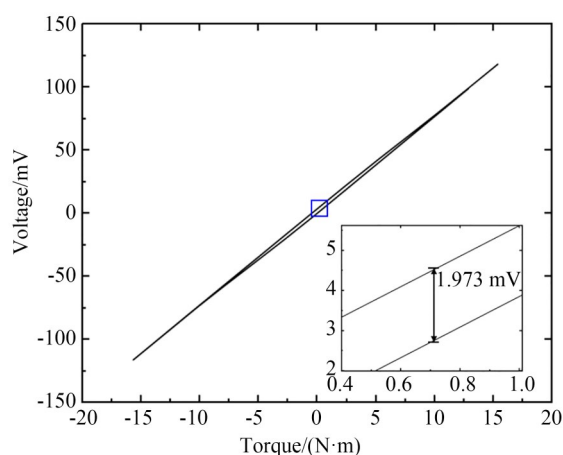


图14 迟滞曲线

Fig. 14 Hysteresis curve

4.3.4 重复性

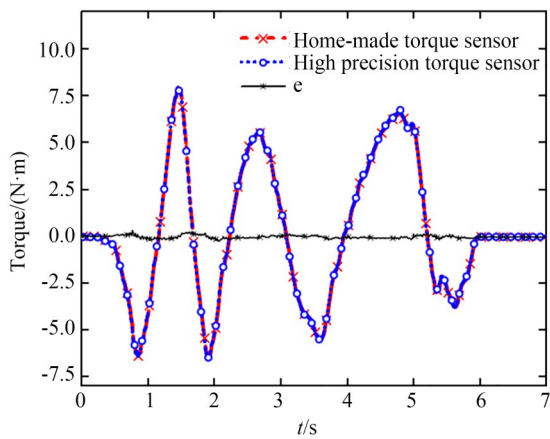
重复性是指转矩传感器在相同的测量条件下,多次重复测量同一输入时输出信号的不一致程度,重复性可以体现出转矩传感器的测量稳定性,是传感器重要性能指标之一。实验中5次加载和卸载过程中自制传感器输出的最大差值为0.682 mV,求得传感器的重复性为:

$$e_z = \frac{0.682}{121.242} \times 100\% = 0.563\%. \quad (12)$$

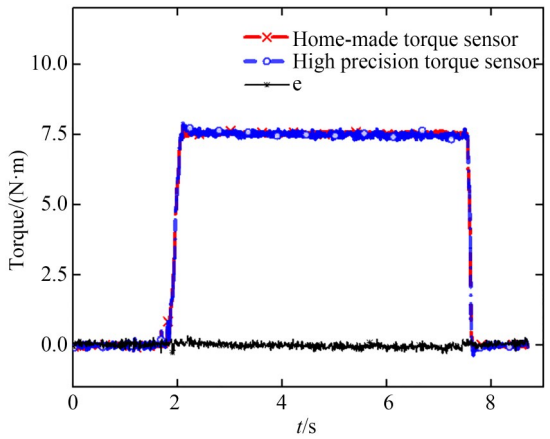
4.4 波发生器静止状态下加载测试

在波发生器静止状态下进行加载实验,在谐波减速器负载端施加瞬时激励和阶跃负载,对比

自制传感器输出信号和高精度转矩传感器输出信号。从图 15 可以看出施加两种状态的负载时,自制传感器与高精度转矩传感器输出一致,其中在施加瞬时激励测试过程中,自制传感器与高精度转矩传感器输出最大差值为 $0.227\text{ N}\cdot\text{m}$,均方根误差 (RMSE) 为 $0.079\text{ N}\cdot\text{m}$,相对误差为 0.988% ;在施加阶跃负载测试过程中,自制传感器与高精度转矩传感器输出最大差值为 $0.114\text{ N}\cdot\text{m}$,RMSE 为 $0.019\text{ N}\cdot\text{m}$,相对误差为 0.253% 。



(a) 瞬时激励
(a) Instantaneous excitation



(b) 阶跃加载
(b) Step load

图 15 瞬时激励和阶跃加载

Fig. 15 Instantaneous excitation and step load

4.5 波发生器旋转状态下加载测试

在进行加载测试前先标定出传感器输出和

波发生器角度间的关系,标定方法如下:控制伺服电机进行间歇旋转运动,为了保证傅里叶级数模型的拟合精度,需要测试两个周期的传感器输出数据,以编码器 0° 位置为起始位置,设置电机每次旋转角度为 4.5° ,旋转 180 次,每次旋转后记录下编码器的角度值以及传感器输出电压,通过 matlab 软件进行傅里叶级数拟合,得到各个参数值。

为了保证重复精度,以上过程重复进行五次,最终将五次标定得到的参数取平均,最终得到波发生器在 $0\sim 720^\circ$ 的剩余纹波信号模型如图 16 所示,计算得到各个系数如表 2 所示。

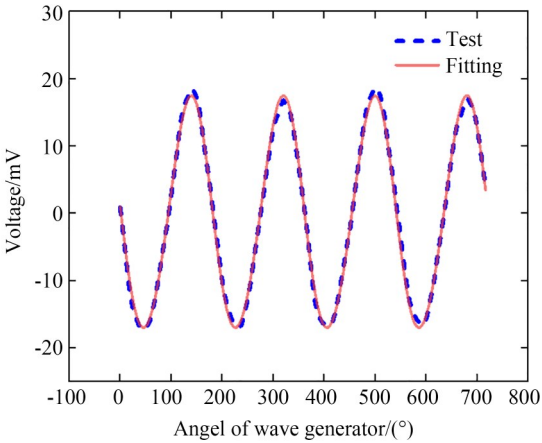


图 16 剩余纹波信号标定

Fig. 16 Calibration curve of remain ripples

表 2 傅里叶级数系数

Tab. 2 Fourier series coefficient

系数	数值
a_0	0.039 47
a_1	1.633 00
a_2	-0.408 1
b_1	-17.140 0
b_2	-0.683 2
ω	0.034 8
R^2	0.999 4

在伺服电机的驱动下进行动态测试,本文在三种负载状态下进行测试,测试一中控制磁粉制动器产生阶梯形式变化的负载转矩进行加载和卸载测试,同时测量自制传感器和高精度转矩传

传感器的输出数据如图 17 所示,自制传感器与高精度转矩传感器在动态测试下的输出基本一致,二者差值的峰峰值为 $2.342 \text{ N}\cdot\text{m}$,RMSE 为 $0.344 \text{ N}\cdot\text{m}$,相对误差为 3.822% 。

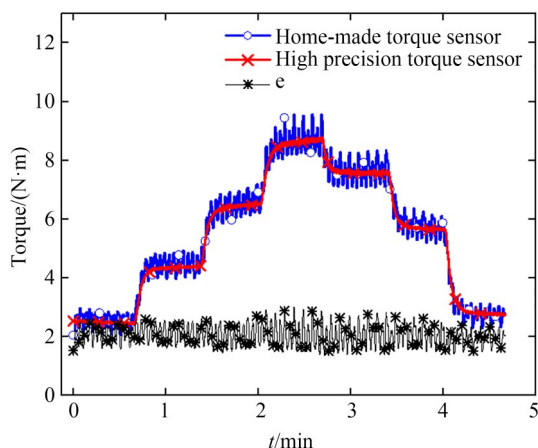


图 17 阶梯加载测试

Fig. 17 Step loading test

测试二将磁粉制动器端改为连杆,并在连杆一端固定砝码,在伺服电机驱动谐波减速器旋转时,谐波减速器输出端会受到正弦形式变化的负载转矩,同时测量自制传感器和高精度转矩传感器的输出数据如图 18 所示,自制传感器与高精度转矩传感器在动态测试下的输出基本一致,二者差值的峰峰值为 $2.571 \text{ N}\cdot\text{m}$,RMSE 为 $0.384 \text{ N}\cdot\text{m}$,相对误差为 4.267% 。

测试三在测试二的基础上进行测试,在连杆转动过程中人为施加一个瞬时的外力,此过程可以模拟机械臂工作过程中与外界发生碰撞的情况,测试自制传感器在工作过程中对碰撞检测的效果,测试结果如图 19 所示,自制传感器与高精度转矩传感器输出差值的峰峰值为 $2.799 \text{ N}\cdot\text{m}$,RMSE 为 $0.401 \text{ N}\cdot\text{m}$,相对误差为 4.456% 。

5 结 论

本文制作并测试了一种嵌入式谐波减速器转矩传感器,并提出了傅里叶级数补偿的方法来提高传感器测量精度。经过实验验证了该方法

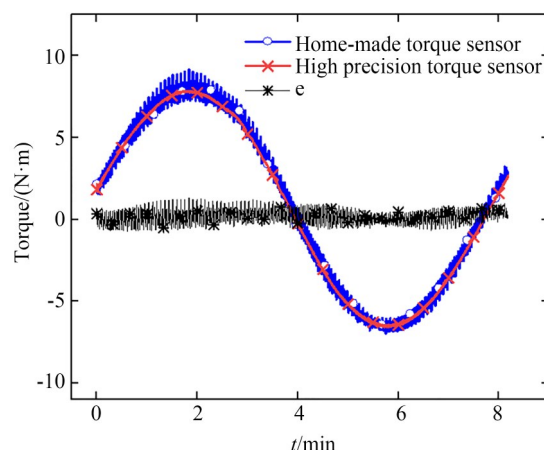


图 18 正弦变化加载测试

Fig. 18 Sinusoidal variation loading test

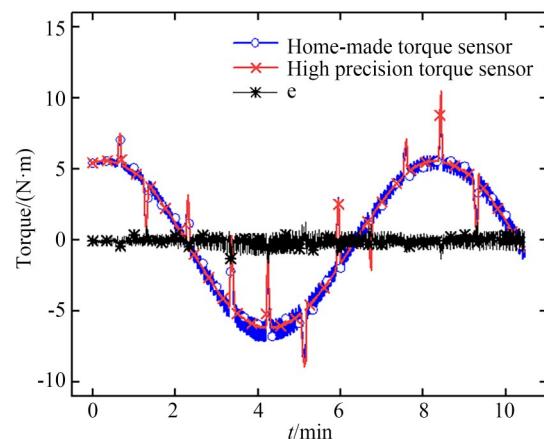


图 19 正弦变化加载过程碰撞测试

Fig. 19 Collision during sinusoidal variation loading test

对传感器输出起到了明显的补偿效果。

研制了测试系统,通过实验测试自制传感器具有良好的灵敏度,在波发生器静止和旋转两种状态下进行加载测试,对比自制传感器与高精度转矩传感器输出信号,测试自制传感器输出性能。波发生器静止状态测试时施加瞬时激励和阶跃负载,自制转矩传感器与标准转矩传感器输出误差分别为 0.988% 和 0.253% ;波发生器旋转状态时施加了阶梯变化、正弦变化、正弦变化过程中碰撞三种形式的负载转矩,自制转矩传感器与标准转矩传感器输出误差分别为 3.822% , 4.267% 和 4.456% 。

参考文献:

- [1] 张奇, 牛廉政, 范亚南, 等. 机器人关节扭矩测试传感器的设计[J]. 传感技术学报, 2020, 33(4): 506-510.
ZHANG Q, NIU L Z, FAN Y N, *et al.* Design of robot joint torque measurement sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(4): 506-510. (in Chinese)
- [2] PERRONE M, MELL S P, MARTIN J, *et al.* Machine learning-based prediction of hip joint moment in healthy subjects, patients and post-operative subjects [J]. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2024: 1-5.
- [3] 马志举, 吴海彬. 无外部传感器的机器人碰撞检测[J]. 测试技术学报, 2013, 27(3): 254-259.
MA Z J, WU H B. Sensorless collision detection for robot manipulator[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2013, 27(3): 254-259. (in Chinese)
- [4] 姚斌, 张建勳, 代煜, 等. 用于微创外科手术机器人的多维力传感器解耦方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 147-153.
YAO B, ZHANG J X, DAI Y, *et al.* Research on decoupling method of multi-dimensional force sensor used in minimally invasive surgical robot[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(1): 147-153. (in Chinese)
- [5] FU B, CAI G W. Design and calibration of a joint torque sensor for robot compliance control [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(19): 21378-21389.
- [6] ZHANG H W, AHMAD S, LIU G J. Torque estimation for robotic joint with harmonic drive transmission based on position measurements [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(2): 322-330.
- [7] 杨聪彬, 郭庆旭, 刘志峰, 等. 谐波传动柔轮变形测量误差分析与补偿[J]. 光学精密工程, 2021, 29(4): 793-801.
YANG C B, GUO Q X, LIU Z F, *et al.* Research on error analysis and compensation method for deformation measurement of flexible wheel of harmonic drive[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(4): 793-801. (in Chinese)
- [8] 王雪竹, 崔龙, 李洪谊, 等. 谐波力矩测量技术分析和优化设计[J]. 宇航学报, 2015, 36(8): 885-892.
- [9] WANG X Z, CUI L, LI H Y, *et al.* Analysis and optimization of torque measurement technique for harmonic drive[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(8): 885-892. (in Chinese)
- [9] HASHIMOTO M, KIYOSAWA Y, PAUL R P. A torque sensing technique for robots with harmonic drives[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(1): 108-116.
- [10] TAGHIRAD H D, BELANGER P R. Torque ripple and misalignment torque compensation for the built-in torque sensor of harmonic drive systems [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998, 47(1): 309-315.
- [11] TAGHIRAD H D, HELMY A, BELANGER P R. Intelligent built-in torque sensor for harmonic drive systems[C]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Sensing, Processing, Networking. IMTC Proceedings. Ottawa, ON, Canada. IEEE*, 1997: 969-974.
- [12] GODLER I, HORIUCHI M, HASHIMOTO M, *et al.* Accuracy improvement of built-in torque sensing for Harmonic Drives [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(4): 360-366.
- [13] GODLER I, HASHIMOTO M, HORIUCHI M, *et al.* Performance of gain-tuned harmonic drive torque sensor under load and speed conditions[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2001, 6(2): 155-160.
- [14] GODLER I. A method to compensate periodic errors by gain tuning in instrumentation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(1): 37-42.
- [15] JUNG B J, KIM B, KOO J C, *et al.* Joint torque sensor embedded in harmonic drive using order tracking method for robotic application[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1594-1599.
- [16] 潘新安, 王洪光, 姜勇. 一种机器人谐波减速器内嵌扭矩传感器的研制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 154-161.
PAN X A, WANG H G, JIANG Y. Development of a built-in torque sensor in harmonic drive gears for robots[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(1): 154-161. (in Chinese)
- [17] 马罗文, 刘宁, 胡心语, 等. FFT 幅相联合的快速高精度频率估计方法[J]. 计测技术, 2022, 42

(6): 34-39.

MA L W, LIU N, HU X Y, *et al.* Fast and high-precision frequency estimation via the combination

of FFT amplitude and phase information[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42

(6): 34-39. (in Chinese)

作者简介:



高海龙(2000—),男,山东德州人,硕士研究生,2021年于中国石油大学(华东)获得学士学位,主要从事机器人关节转矩测量方面的研究。E-mail: ghl652956@mail.dlut.edu.cn

导师简介:



娄志清(1978—),男,黑龙江肇东人,大连理工大学副教授,研究方向为微小组件自动装配技术、数控机床误差测量与补偿技术等。E-mail: louzfq@dlut.edu.cn