

文章编号 1004-924X(2025)13-2066-10

谐波减速器集成式薄膜温度传感器设计与测试

曹嘉鋆, 沈文强, 王晓东, 杨金祎, 娄志峰*
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:谐波减速器工作状态下温度数据的实时采集和监控有助于及时对谐波减速器进行故障诊断和性能优化,因此提出一种原位集成于谐波减速器内部的薄膜温度传感器。为降低谐波减速器工作时柔轮应变对温度传感器测温准确性的影响,采用有限元计算方法分析谐波减速器不同工作状态下的应变规律,对薄膜温度传感器进行结构设计降低应变对测温的干扰。基于 MEMS 工艺制备薄膜温度传感器,对应变影响进行温度补偿,并对传感器的测温性能进行测试。测试结果表明,薄膜温度传感器静态测温精度为 $\pm 0.30\%$,动态测温精度为 $\pm 0.52\%$ 。对自制薄膜温度传感器测温性能进行重复实验,在 20~120 °C 温度内,相对于标准温度传感器的标准差为 0.072~0.296 °C,实现了谐波减速器工作温度信号的实时采集。

关键词:温度传感器;谐波减速器;有限元分析;集成式传感器

中图分类号:TP242 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253313.2066 CSTR:32169.14.OPE.20253313.2066

Design and testing of thin-film temperature sensors integrated on harmonic reducer

CAO Jiajun, SHEN Wenqiang, WANG Xiaodong, YANG Jinyi, LOU Zhifeng*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

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

Abstract: Real-time acquisition and monitoring of temperature data during the operation of harmonic reducers are crucial for timely fault diagnosis and performance optimization. This study presents an in situ integrated film temperature sensor within the harmonic reducer. To minimize the impact of flexspline strain on the accuracy of temperature measurements, finite element analysis was employed to characterize the strain distribution under various operating conditions. Subsequently, the sensor's structural design was optimized to mitigate strain-induced measurement interference. Utilizing MEMS technology, the film temperature sensor was fabricated, with strain effects compensated to enhance measurement precision. Evaluation results demonstrate a static temperature measurement accuracy of $\pm 0.3\%$, an accuracy of $\pm 0.047\%$ during wave generator rotation, $\pm 0.23\%$ at 18.39 °C, and $\pm 0.52\%$ at 50.21 °C. Furthermore, repeatability tests conducted between 20 °C and 120 °C yielded standard deviations relative to a reference temperature sensor ranging from 0.072 °C to 0.296 °C, confirming reliable real-time temperature acquisition. These findings indicate that the developed film temperature sensor can accurately monitor the

收稿日期:2025-04-16;修订日期:2025-06-18.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFB4704301)

operating temperature of harmonic reducers, providing a valuable tool for improved diagnostic and optimization processes.

Key words: temperature sensor; harmonic reducer; finite element analysis; integrated sensor

1 引 言

协作机器人是一种新型的工业机器人,具有轻量灵活、安全智能等特点,可以与人类在同一空间有效地协同工作,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]。谐波减速器凭借其结构简单、传递功率大、可靠性高、轻量化等优点广泛应用于协作机器人关节中。然而,谐波减速器在工作过程中,内部柔性齿轮会因摩擦、润滑不当^[3]等原因产生热量,导致谐波减速器温度逐渐升高,过高的温度会导致柔轮自身材料性能下降、疲劳失效,威胁到协作机器人关节的性能、寿命和安全性。因此,对谐波减速器工作过程的温度信号进行实时采集、监控和管理对于提升协作机器人性能至关重要^[4-8]。

目前,谐波减速器的测温方法主要有 3 种。第一种是粘贴温度传感器,通过在谐波减速器柔轮和刚轮啮合处、刚轮处^[5,7-8]粘贴温度传感器实现对谐波减速器的温度测量与监测。使用胶水粘贴温度传感器方便快捷、安装位置灵活,但是胶水会随时间推移而老化失去粘性,影响传感器稳定性和测温精度。第二种是建立数学模型,分析摩擦力矩中温度参数的影响,对谐波减速器运行特性进行数学建模^[9-10]。但是摩擦数学模型对减速器诸多工况进行简略处理,不能覆盖温度的显著变化,当运行环境发生变化时需要重新校准初始参数,耗时较长。第三种是非接触式测温,使用红外温度检测装置对谐波减速器的柔性齿轮进行非接触式温度检测^[3]。但是红外温度检测装置测量结果会受环境影响,导致测温不准确。

针对上述测温方法的不足,薄膜温度传感器被提出,它是直接将温度敏感薄膜直接沉积在被测构件表面,具有灵敏度高、易于集成等优点。本文设计了一种薄膜温度传感器,将其原位集成于谐波减速器内部,用于监测谐波减速器在运行状态下的温度情况。对谐波减速器进行有限元分析获取柔轮在不同工作状态下应变变化规律以降低柔轮受波发生器旋转、外部载荷以及温度

变化柔轮自身热膨胀产生的应变对测温的干扰。根据应变规律对传感器进行结构设计利用柔轮自身应变规律,减小谐波减速器工作时应变对薄膜温度传感器温度测量的影响。利用 MEMS 工艺在柔轮上制备绝缘层、温度敏感层和保护层,并搭建实验测试平台对薄膜温度传感器测温性能进行研究。

2 薄膜温度传感器设计与制备

谐波减速器基本构件包括波发生器、柔轮和刚轮,如图 1 所示。本课题所研究的谐波减速器的柔轮为礼帽型,其输入端为波发生器,输出端为刚轮,柔轮固定不动。

谐波减速器的测温点多布置在刚轮某点和啮合齿处^[5-9],但是柔轮在运行过程中容易因过热导致自身材料性能下降、疲劳失效甚至断裂,从而影响传动精度。因此,本文选择在柔轮上布置谐波减速器测温点。

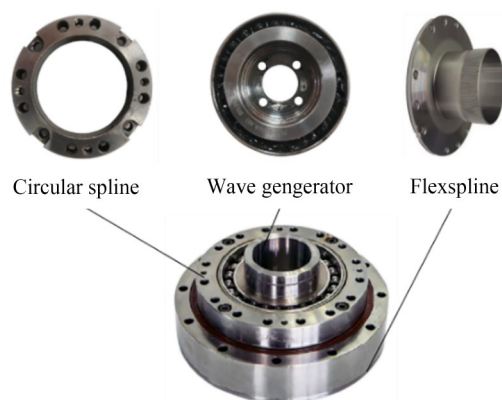


图 1 礼帽形谐波减速器构成

Fig. 1 Top hat shaped harmonic reducer components

2.1 传感器结构设计

2.1.1 传感器布置位置

柔轮作为一个薄壁壳体,承受弯曲应变、扭转应变和热应变,其在工作状态下受波发生器、外部载荷和温度变化的多重作用,处于循环弹

性变形的状态。为了准确测量工作状态下柔轮表面温度,减小柔轮因变形引起的机械应变和热应变带来的测试干扰,对谐波减速器进行有限元分析,探究柔轮应变规律。使用 Solidworks 对谐波减速器进行三维建模,将模型导入 Ansys Workbench,进行多物理场仿真。图 2 为谐波减速器柔轮在波发生器、扭矩和温度共同作用下的应变分布云图,可以得出,筒体与底面连接位置处以及筒体位置受较大应变并且柔轮筒体为曲面,难以制备均匀膜层,对温度的测量造成影响,同时筒体部分易受油污污染,因此,筒体部分不适合布置薄膜温度传感器。柔轮法兰处外圈受应变影响相比凸台底部受应变影响较小,在法兰外圈制备温度传感器,传感器引线和谐波减速器装配时易损坏温度传感器,因此,选择柔轮凸台底面受应变较小位置制备温度传感器。由图 2(b)可以得出,柔轮底面 $\Phi 44 \sim 44.6$ mm 处应变值明显小于其他位置,因此选择该位置制备薄膜温度传感器,如图 3 所示。使用

MEMS 工艺制备薄膜温度传感器并不改变谐波减速器结构,因此不会对谐波减速器的性能产生影响,同时也不影响谐波减速器在机器人关节内的安装。

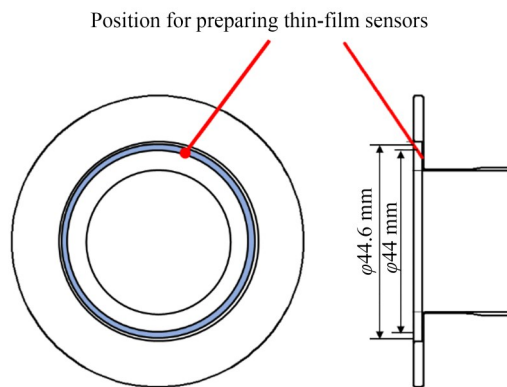


图 3 薄膜温度传感器制备位置

Fig. 3 Thin film temperature sensor preparation position

2.1.2 传感器结构设计

在低温段电阻型温度传感器的温度响应为:

$$R = AT + BT^2 + R_0, \quad (1)$$

式中: A 为一次温度灵敏系数, B 为二次温度灵敏系数, R_0 为初始阻值, 即 0°C 时传感器阻值。

其应变响应为:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon, \quad (2)$$

式中: ΔR 为应变引起的电阻阻值变化量, k 为应变灵敏系数, ϵ 为微应变。

本文的薄膜温度传感器在温度测量过程中受到波发生器旋转、外部载荷和温度变化柔轮热膨胀引起的应变干扰。如图 4 所示, 在柔轮表面上取一被测点 A , 在被测点 A 上取一个微型正方形单元体作为研究对象。谐波减速器工作过程中, 柔轮底面单元点 A 位置离轴心距离 r , 波发生器转动角度 ω , 加载扭矩 M_i , ΔT 温度变化的环境下, A 位置处应变值为 $\epsilon = f(r, \omega, M_i, \Delta T)$ 。

根据谐波减速器的工作原理可知, 波发生器每个转动周期内使柔轮同一位置发生两次受迫变形, 因此单元点 A 处发生两次变形, 其变形周期为波发生器转动周期两倍。根据柔轮椭圆变形的周期和谐波传动原理, 谐波减速器单元体柔

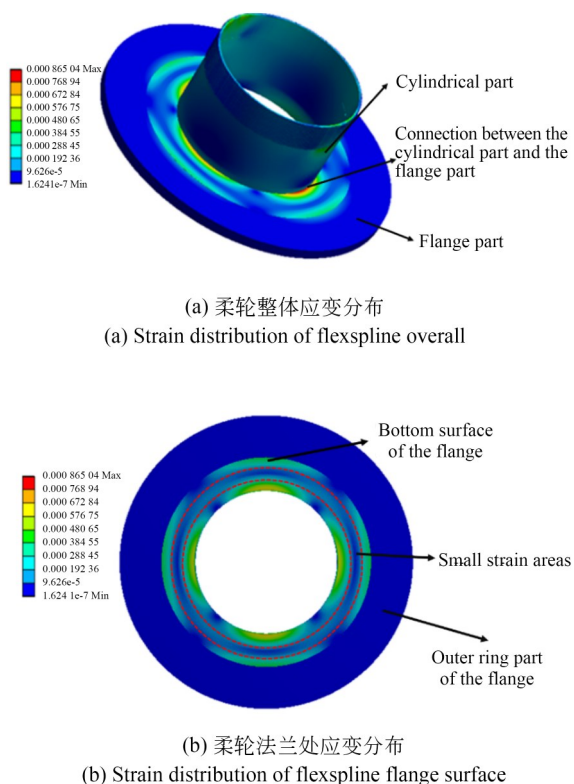
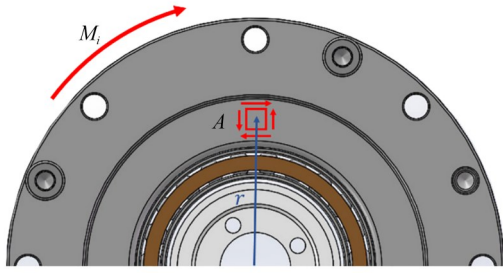
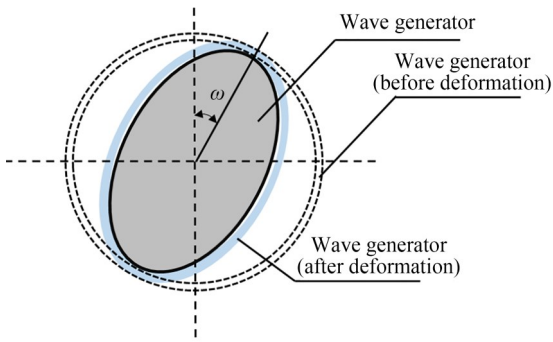


图 2 柔轮应变分布云图

Fig. 2 Cloud chart of flexspline strain distribution



(a) 柔轮上的单元体
(a) A element on the flexspline



(b) 柔轮单元体应变圆
(b) Flexspline unit strain circle

图 4 柔轮应变分析

Fig. 4 Flexspline strain analysis

轮受波发生器旋转产生应变为:

$$\epsilon_1 = f(r, \omega) = a_r + b_r \cos(2\omega), \quad (3)$$

其中: a_r 表示柔轮的基础椭圆应变, 为常量; $b_r \cos(2\omega)$ 表示波发生器旋转引起的应变。

谐波减速器工作过程中, 扭矩 M_i 引起的单元体应变为:

$$\epsilon_2 = f(r, M_i) = \frac{M_i}{4\pi r^2 t G}, \quad (4)$$

式中: t 为柔轮厚度, G 为柔轮剪切模量。

假设柔轮底面为一个环状薄板, 薄板所受温度变化均匀, 并且薄板的线膨胀系数 α 是各向同性的, ΔT 引起的单元体应变为:

$$\epsilon_3 = f(\Delta T) = \alpha \Delta T. \quad (5)$$

因此, 柔轮底面某点所受应变应为:

$$\epsilon = f(r, \omega, M_i, \Delta T) = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = a_r + b_r \cos(2\omega) + \frac{M_i}{4\pi r^2 t G} + \alpha \Delta T, \quad (6)$$

提取 $\Phi 44 \sim 44.6$ mm 圆周路径处不同温度、

扭矩下的应变值, 得到:

$$\begin{aligned} \int_{\omega}^{\pi+\omega} f(r, \omega, M_i, \Delta T) d\omega &= \\ \int_{\pi+\omega}^{2\pi+\omega} f(r, \omega, M_i, \Delta T) d\omega &= \\ \int_{\pi+\omega}^{2\pi+\omega} \frac{M_i}{4\pi r^2 t G} d\omega &= \frac{M_i}{4r^2 t G}. \end{aligned} \quad (7)$$

如图 5 所示, 受波发生器影响, 圆周路径应变呈周期性波动, 以 180° 为周期, 即 180° 不同扭矩、温度下应变积分值相等。

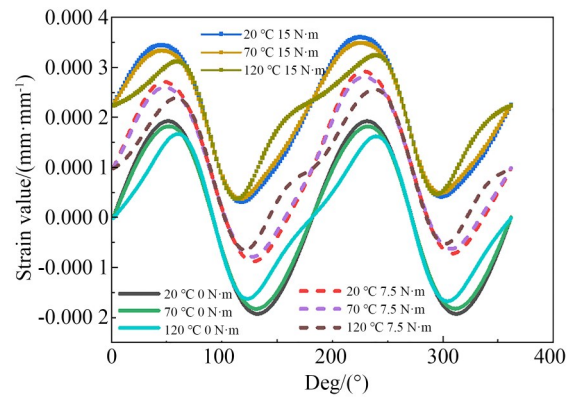


图 5 圆周路径应变曲线

Fig. 5 Circumferential strain curves

空载时不同温度下柔轮底面一半圆周路径内应变积分值为 0, 即有:

$$\begin{cases} \int_{\omega}^{\pi+\omega} f(r, \omega, M_0, \Delta T) d\omega = 0 \\ \int_{\pi+\omega}^{2\pi+\omega} f(r, \omega, M_0, \Delta T) d\omega = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

由有限元分析可得, 圆周路径的应变积分仅与所受扭矩有关, 因此, 温度传感器整体结构设计应为圆环状^[20], 以确保采集同一圆周内所有应变值以消除波发生器旋转和柔轮受热膨胀的干扰, 如图 6 所示。

仿真得到的圆周路径应变值如表 1 所示。根据电阻变化率式(2)可知, 应变引起的温度传感器电阻变化率最大达到 4×10^{-4} , 温度变化 1°C 时温度传感器的电阻变化率为 $3.2 \times 10^{-3} \sim 5.5 \times 10^{-3}$ ^[10-16], 仿真分析谐波减速器运行时应变对温度传感器测温的影响较小。

由于 MEMS 工艺制备的薄膜温度传感器在未经过稳定化处理状态下薄膜内部存在缺陷, 其温度灵敏系数较小, 应变灵敏系数较大, 单一环

表 1 不同扭矩和温度下的应变值

Tab. 1 Strain values at different torques and temperatures

扭矩/(N·M)	温度/℃	应变值/(mm·mm ⁻¹)
0	20	6.5×10^{-10}
	120	6.4×10^{-8}
7.5	20	7.4×10^{-5}
	120	8.2×10^{-5}
15	20	2×10^{-4}
	120	1.6×10^{-4}

状结构不能完全消除扭矩对温度测量的干扰。因此,本文将薄膜温度传感器设计为环状结构,分为左右两串进行温度补偿,提高测温精度。在低温度段,电阻型薄膜温度传感器阻值为:

$$R = AT + BT^2 + CM_i + R_0, \quad (9)$$

式中: $C = \frac{1}{4r^2tG}$, 为扭矩灵敏系数,当传感器位置确定时,其值为常数。MEMS工艺制备的薄膜温度传感器温度灵敏系数与扭矩灵敏系数与基底表面粗糙度、热处理工艺有关。由于柔轮底面同一圆周路径上所受扭矩值相同,原位集成的左右两个温度敏感单元感受同一温度时可以建立方程组:

$$\begin{cases} R_1 = A_1T + B_1T^2 + C_1M_i + R_{01} \\ R_2 = A_2T + B_2T^2 + C_2M_i + R_{02} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: A_1, A_2 为左右两个薄膜温度传感器的一次温度灵敏系数, B_1, B_2 为左右两个薄膜温度传感器的二次温度灵敏系数, C_1, C_2 为两个传感器的扭矩灵敏系数, R_{01}, R_{02} 为两个传感器的初始电阻。联立方程组可以抵消扭矩,得到温度与电阻

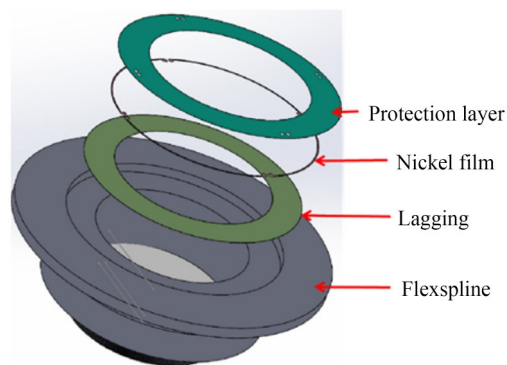
的关系式:

$$T = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4aR'}}{2a}, \quad (11)$$

其中: $a = \frac{C_2}{C_1}B_1 - B_2$, $b = \frac{C_2}{C_1}A_1 - A_2$, $R' = \frac{C_2}{C_1}(R_{01} - R_1) - (R_{02} - R_2)$ 。因此,仅需对左右两侧的薄膜热电阻进行实时测量,即可得到相应温度。

2.2 传感器制备流程

薄膜温度传感器的工作原理是通过敏感功能层将温度信号转变为电阻信号,然而,谐波减速器的柔轮采用导电合金材料构成,为保证薄膜温度传感器的电学性能不受金属基底导通的影响,需要在金属基底与薄膜温度传感器之间沉积一层绝缘层来实现电学隔离。在温度敏感功能层上制备保护层同时能够防止氧化以及其他破坏对温度传感器形成测试干扰。图 7(a)为薄膜



(a) 结构示意图

(a) Schematic structure

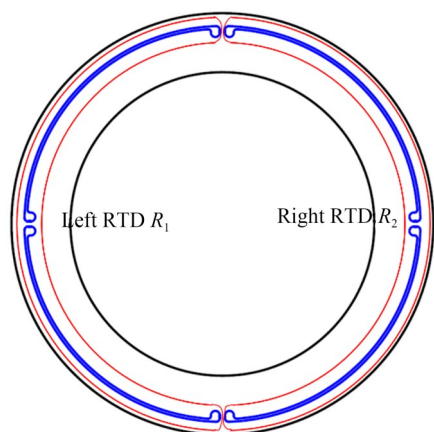


图 6 温度传感器敏感栅结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of temperature sensor sensitive grid



(b) 实物图

(b) Actual image

图 7 薄膜温度传感器

Fig. 7 Thin film temperature sensor

传感器结构,绝缘层和保护层选择 Parylene C 薄膜,由于其化学惰性、高介电强度,以及活性分子的良好渗透,可以室温下在器件上形成无针孔、厚度均匀而透明的绝缘层,并与 MEMS 工艺技术兼容^[17-18]。镍金属在 $-60 \sim +180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内就温度而言拥有比铂金属更高的灵敏度,并且镍金属附着性较强,因此温度敏感层材料选择镍。图 7(b) 为由 MEMS 工艺制备完成的薄膜温度传感器。

3 传感器性能测试

3.1 测试实验系统

薄膜温度传感器制备完成后,对其各项性能进行标定。工作过程中,其阻值变化与温度、扭矩相关,因此需要搭建测试系统得到其温度灵敏系数和扭矩灵敏系数。

3.1.1 温度敏感性测试系统

薄膜温度传感器的温度灵敏系数标定中,使用恒温油槽控制温度传感器测试环境的温度,在自制温度传感器附近安装标准温度传感器,以标准温度传感器所示温度为标定数据。标准温度传感器所示温度值与自制温度传感器阻值通过 Keithley 2700 数字万用表实时采集反馈给工控机,如图 8 所示。

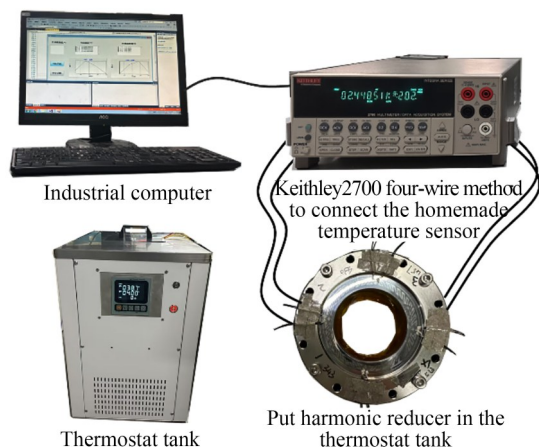


图 8 温度敏感性测试系统

Fig. 8 Temperature sensitivity test system

3.1.2 扭矩敏感性测试系统

谐波减速器运行时扭矩加载产生的应变会影响自制薄膜温度传感器测温,需要搭建扭矩测试系统,标定扭矩以消除扭矩对温度传感器的测

温影响。扭矩敏感性测试系统如图 9 所示^[19-20]。伺服电机连接角度编码器作为动力输入与谐波减速器的波发生器相连,刚轮作为谐波减速器输出端连接标准扭矩传感器,随后连接扭矩加载设备磁粉制动器,自制薄膜温度传感器接入数字万用表反馈给工控机控制软件。

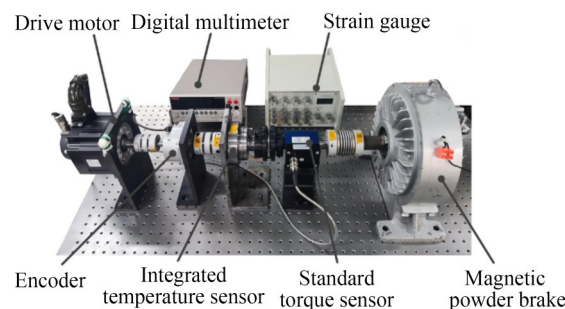


图 9 扭矩敏感性测试系统

Fig. 9 Torque sensitivity test system

3.2 温度传感器灵敏度标定

采用四线制连接方式将自制温度传感器和标准温度传感器接入万用表,并将二者置于恒温槽内同一深度,待恒温槽油温稳定后同时记录自制温度传感器的阻值和标准温度传感器所示温度。在 $20 \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内对薄膜温度传感器进行温度标定,结果如图 10 所示。

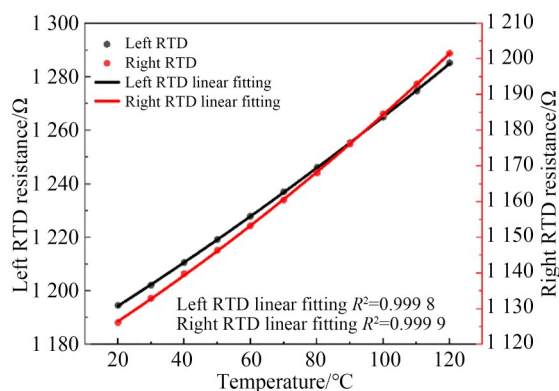


图 10 温度标定结果

Fig. 10 Temperature calibration results

对实验数据进行二次多项式最小二乘法拟合,建立温度与传感器阻值的拟合表达式为:

$$\begin{cases} R_1 = 0.748T + 0.001T^2 + 1178.869 \\ R_2 = 0.565T + 0.001T^2 + 1114.554 \end{cases} \quad (12)$$

测温前,需要对薄膜温度传感器进行扭矩标

定以实现温度补偿。标定过程中,谐波减速器输入端固定不动,在输出端施加 $0\sim 15\text{ N}\cdot\text{m}$ 的扭矩,通过标准扭矩传感器获得实际所加扭矩大小,万用表实时采集两串温度敏感单元阻值,获得图 11 所示电阻值与实际扭矩的对应关系,对获得的数据进行最小二乘法拟合,得到左侧温度敏感单元应变灵敏系数 $C_1=0.253\text{ }\Omega/\text{N}\cdot\text{m}$,右侧温度敏感单元应变灵敏系数 $C_1=0.305\text{ }\Omega/\text{N}\cdot\text{m}$ 。由标定结果可知,同一批用 MEMS 工艺制备的薄膜温度传感器阻值相差较大,并且对温度的灵敏性不同,温度、扭矩与阻值拟合线性度均良好。

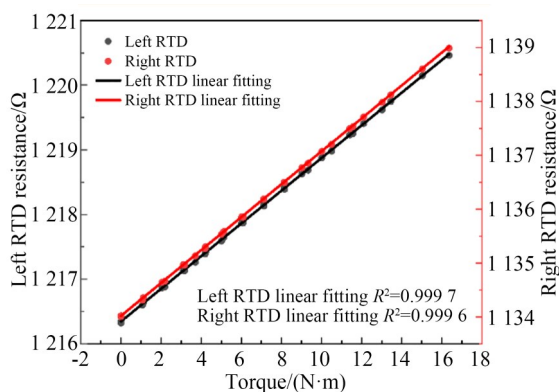


图 11 扭矩标定结果

Fig. 11 Torque calibration results

3.3 传感器测温性能测试

通过对温度敏感单元的温度敏感性能标定和扭矩敏感性能标定,可以得到两串薄膜电阻与温度和扭矩的关系式如下:

$$T = \frac{-33.798 + \sqrt{15.846R_1 - 13.122R_2 - 2917}}{0.066} \quad (13)$$

图 12 为薄膜温度传感器静态测温情况,即温度传感器仅受温度变化。测试结果显示,测温误差为 $\pm 0.30\text{ }^\circ\text{C}$,测温精度为 $\pm 0.30\%$ 。

图 13 为薄膜温度传感器的动态测温情况,即温度传感器受机械应变和温度变化的影响。图 13(a)为波发生器旋转未施加扭矩情况下的测温情况,结果显示测温误差为 $\pm 0.047\text{ }^\circ\text{C}$,测温精度为 $\pm 0.047\%$ 。图 13(b)和 13(d)为波发生器转速恒定,施加扭矩下自制薄膜温度传感器的阻值情况。当扭矩改变时,自制温度传感器阻值也随之

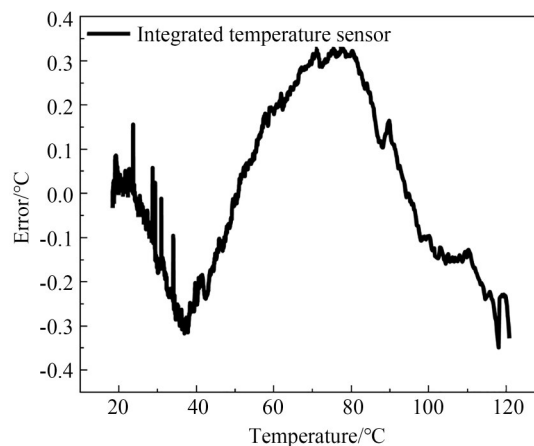
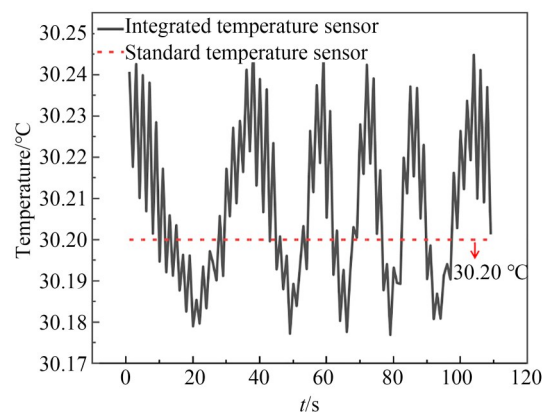


图 12 薄膜温度传感器静态测温情况

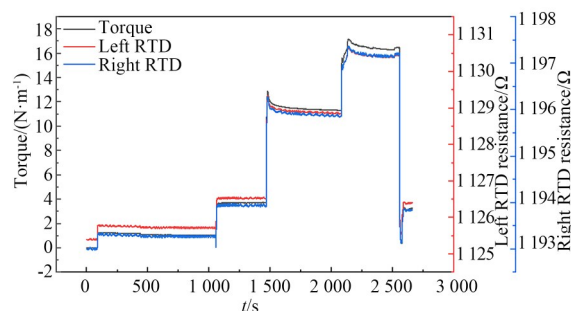
Fig. 12 Static temperature measurement conditions of thin-film temperature sensors

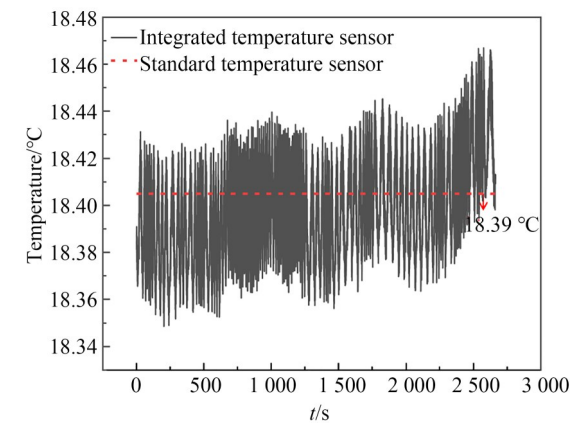
变化,用式(13)计算得到 $18.39\text{ }^\circ\text{C}$ 时自制温度传感器输出温度与标准温度传感器输出温度的误差范围为 $\pm 0.23\text{ }^\circ\text{C}$,温度测量结果如图 13(c)所示,测温精度为 $\pm 0.23\%$ 。50.21 $^\circ\text{C}$ 时自制温度



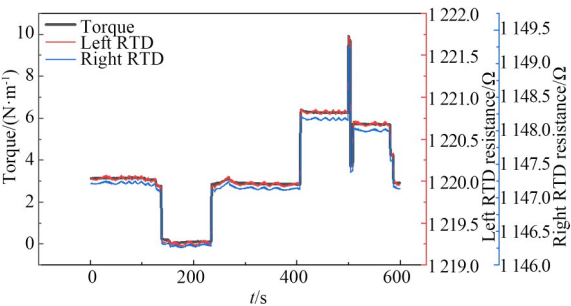
(a) 波发生器旋转下温度传感器测温情况

(a) Temperature measurement with the wave generator rotates downward

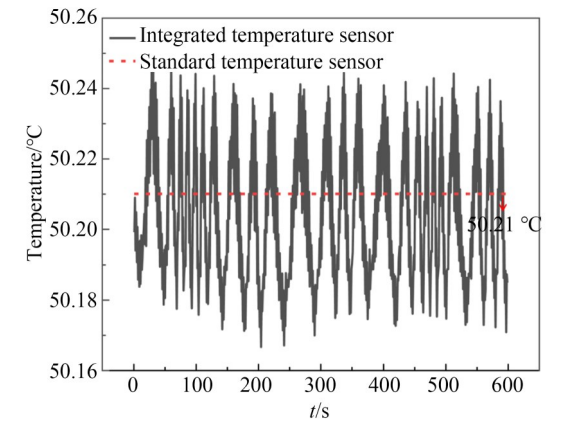
(b) 施加扭矩阻值变化(18.39 $^\circ\text{C}$)(b) Variation of resistance value with torque(18.39 $^\circ\text{C}$)



(c) 自制温度传感器测温情况(18.39 °C)
(c) Temperature measurement with integrated temperature sensor at 18.39 °C



(d) 施加扭矩阻值变化(50.21 °C)
(d) Variation of resistance with torque(50.21 °C)



(e) 自制温度传感器测温情况(50.21 °C)
(e) Temperature measurement with integrated temperature sensor at 50.21 °C

图 13 薄膜温度传感器的动态测温情况
Fig. 13 Dynamic temperature measurement with thin-film temperature sensors

传感器与标准温度传感器的输出温度误差为 $\pm 0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度测量结果如图 13(e)所示,测温精度为 $\pm 0.52\%$ 。由测试结果可知,所制备的薄膜温度传感器双线条测温方式下测温精度较高。

对所制备的薄膜温度传感器进行重复性实验,获得的温度测量曲线如图 14 所示,测量标准差如表 2 所示。和标准温度传感器对比,薄膜温度传感器所示温度没有明显的漂移,并且在 $20\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,薄膜温度传感器温度的测量标准差在 $0.072\sim 0.196\text{ }^{\circ}\text{C}$,表现出较好的稳定性。

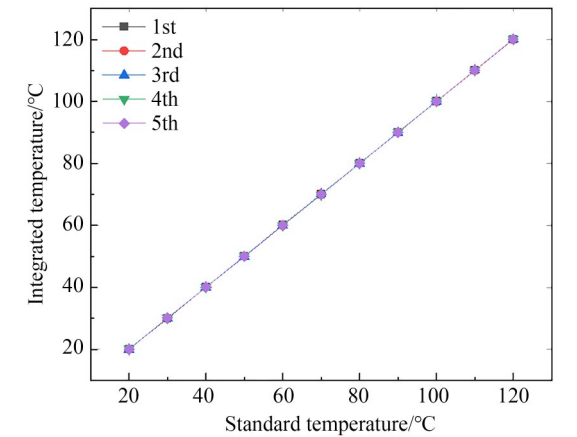


图 14 薄膜温度传感器重复性测试
Fig. 14 Repetitive testing of thin film temperature sensor

表 2 薄膜温度传感器的温度测量标准差	
Tab. 2 Standard deviation of thin film temperature sensor	
温度/ $^{\circ}\text{C}$	标准差/ $^{\circ}\text{C}$
20	0.146
30	0.188
40	0.153
50	0.161
60	0.202
70	0.296
80	0.284
90	0.122
100	0.072
110	0.121
120	0.192

4 结 论

本文针对现有谐波减速器测温精度不高的问题,利用有限元分析方法和 MEMS 技术制备了一种原位集成于谐波减速器内部的薄膜温度传感器。通过有限元分析获取谐波减速器柔轮底面应变规律,为消除波发生器旋转、外部载荷

和柔轮热膨胀对薄膜温度传感器测温带来的干扰,设计传感器温度敏感栅结构为环状,分为左右两个半圆状测温单元,敏感栅布置在 $\Phi 44\sim\Phi 44.6$ mm位置处。对制备的原位集成式薄膜温度传感器进行测试,标定获得两串温度敏感单元一次温度灵敏系数分别为 $0.748\ \Omega/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.565\ \Omega/^{\circ}\text{C}$,二次温度敏感系数均为 $0.001\ \Omega/^{\circ}\text{C}^2$ 。扭矩敏感系数分别为 $0.253\ \Omega/\text{N}\cdot\text{m}$ 和 $0.305\ \Omega/\text{N}\cdot\text{m}$ 。测试结果表明,薄膜温度传感器的静态测温精度为 $\pm 0.3\%$,动态测温精度为 $\pm 0.52\%$ 。对自制温度传感器进行重复性实验,在 $20\sim 120\ ^{\circ}\text{C}$ 温度内,相对于标准温度传感器的标准差为 $0.072\sim$

$0.296\ ^{\circ}\text{C}$,测量稳定性较高。

作者贡献声明:

曹嘉鋆:传感器设计与仿真分析,实验测试与数据分析,论文初稿撰写;

沈文强:传感器优化设计,实验测试与数据处理,论文修改;

王晓东:研究指导,实验设备支持,论文修改;

杨金祎:实验测试,数据采集与处理,论文图表制作与校对;

姜志峰:研究方案统筹,实验指导与数据分析,论文审核。

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 ZH, 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*, 2025, 28(7): 1093-1097.
- [3] 李晓辉,刘继奎,王术. 601EF 脂润滑谐波减速器热真空传动性能试验研究[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(5): 450-453.
LI X H, LIU J K, WANG SH. Transmission performance test of harmonic gear lubricated with 601EF grease under vacuum thermal cycling environment [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(5): 450-453. (in Chinese)
- [4] 王亚晖,刘积昊,管恩广,等. 谐波减速器疲劳失效特征分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(23): 159-164.
WANG Y H, LIU J H, GUAN E G, *et al.* Analysis of fatigue failure characteristics of harmonic reducer[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(23): 159-164. (in Chinese)
- [5] 屈斌,李钊,郭新,等. 温度对应变片式扭矩传感器精度的影响及其校正[J]. 电机技术, 2020(5): 59-61.
- [6] ZHAO Y Y, LI P X, DING H L, *et al.* Harmonic reducer performance prediction algorithm based on multivariate state estimation and LargeVis dimensionality reduction [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 126762-126774.
- [7] PEREZ-DIAZ J, DIEZ-JIMENEZ E, VALIENTE-BLANCO I, *et al.* Performance of magnetic-superconductor non-contact harmonic drive for cryogenic space applications [J]. *Machines*, 2015, 3(3): 138-156.
- [8] VASSILEVA D, KIYOSAWA Y, SUZUKI M. Sensorless torque control for a robot with harmonic drive reducers[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2011, 39(2): 253-267.
- [9] 石峯,尹华川,李俊阳,等. 谐波减速器摩擦特性建模及参数辨识[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 89-96, 110.
SHI Y, YIN H CH, LI J Y, *et al.* Modeling and parameter identification of friction characteristics of harmonic reducer[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(1): 89-96, 110. (in Chinese)
- [10] 徐东,张乐,罗仲龙. 一种用于谐波减速器柔性齿轮温度检测的装置: CN112432710A[P]. 2021-03-02.
XU D, ZHANG L, LUO ZH L. A device for temperature detection of flexible gears in harmonic reducers: CN112432710A [P]. 2021-03-02. (in

- Chinese).
- [11] DOLBIER W R, BEACH W F. Parylene-AF4: a polymer with exceptional dielectric and thermal properties [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2003, 122(1): 97-104.
 - [12] YAN W P, LI H N, LIU J S, *et al.* EPMA and XRD study on nickel metal thin film for temperature sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 136(1): 212-215.
 - [13] XU J, SHAO T M, JIN G. Effect of processing conditions on microstructure and electrical characteristics of Ni thin films [J]. *Vacuum*, 2009, 84(4): 478-482.
 - [14] MA B H, REN J Z, DENG J J, *et al.* Flexible thermal sensor array on PI film substrate for underwater applications [C]. 2010 *IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. January 24-28, 2010. *Wan-chai, Hong Kong, China*. IEEE, 2010: 679-682.
 - [15] PHATTHANAKUN R, DEEKLA P, PUMMA-RA W, *et al.* Design and fabrication of thin-film aluminum microheater and nickel temperature sensor [C]. 2012 *7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*. March 5-8, 2012. *Kyoto, Japan*. IEEE, 2012: 112-115.
 - [16] TURKANI V S, NARAKATHU B B, MAD-DIPATLA D, *et al.* Nickel based printed resistance temperature detector on flexible polyimide substrate [C]. 2018 *IEEE SENSORS. October 28-31, 2018. New Delhi*. IEEE, 2018: 1-4.
 - [17] CUI J T, LIU H, LI X L, *et al.* Fabrication and characterization of nickel thin film as resistance temperature detector [J]. *Vacuum*, 2020, 176: 109288.
 - [18] RODGER D C, LI W, AMERI H, *et al.* Flexible parylene-based microelectrode technology for intra-ocular retinal prostheses [C]. 2006 *1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. January 18-21, 2006. *Zhuhai, China*. IEEE, 2006: 743-746.
 - [19] 王晓东, 杜志杰, 沈文强, 等. 谐波减速器集成式扭矩传感器的设计与测试 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(19): 2899-2910.
WANG X D, DU ZH J, SHEN W Q, *et al.* Design and testing of harmonic reducer integrated with torque sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(19): 2899-2910. (in Chinese)
 - [20] 高海龙, 沈文强, 杜志杰, 等. 谐波减速器转矩原位测量及误差补偿 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(12): 1857-1867.
GAO H L, SHEN W Q, DU ZH J, *et al.* Development of integrated torque sensor for harmonic reducer and Error Compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(12): 1857-1867. (in Chinese)

作者简介:



曹嘉鋆(2000—),女,江苏泰州人,硕士研究生,2022年于西安理工大学获得学士学位,主要从事机器人关节温度测量方面的研究。E-mail: csx2000820@163.com

通讯作者:



娄志清(1978—),男,黑龙江肇东人,副教授,1999年、2008年于大连理工大学分别获得学士和博士学位,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: louzf@dlut.edu.cn