

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108702

基于分段线性插值法的应变片式扭矩传感器的温度补偿^{*}

张紫嫣 卢文科 左锋 丁勇
(东华大学信息科学与技术学院 上海 201620)

摘要: 本文针对应变片式扭矩传感器的温度漂移现象,建立基于分段线性插值法的温度补偿模型,将扭矩和温度的二维标定数据嵌入到数据融合软件算法中,根据精度要求分为多个不同区间并将区间内的标定数据代入线性表达式,输出预测扭矩值,从而实时矫正该传感器扭矩随温度的漂移,使其具有温度自补偿功能。研究结果表明,利用分段线性插值法补偿后该传感器的灵敏度温度系数由 $7.615 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 提升至 $1.429 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$,温度附加误差相对值由 2.67% 提升至 0.5%,均提升了 5 倍以上。该方法简单有效,实现了扭矩传感器的实时温度补偿,提高了扭矩传感器的温度稳定性。

关键词: 扭矩传感器;温度补偿;分段线性插值法;灵敏度温度系数

中图分类号: TP212 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8040

Temperature compensation of strain gauge torque sensor based on piecewise linear interpolation method

Zhang Ziyan Lu Wenke Zuo Feng Ding Yong
(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the temperature drift phenomenon of strain gauge torque sensor, the temperature compensation model based on piecewise linear interpolation method was established, and the two-dimensional calibration data of torque and temperature were embedded into the data fusion software algorithm. According to the accuracy requirement, the data was divided into multiple different intervals and the calibration points in the intervals were replaced into the linear expression. Then the predicted torque value was output. In this way, the temperature drift of the torque sensor was corrected in real time, so that the sensor has the function of temperature self-compensation. The results show that after compensation by piecewise linear interpolation, the sensitivity temperature coefficient of the sensor is increased from $7.615 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ to $1.429 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, and the relative value of temperature additional error is increased from 2.67% to 0.5%, both of which are increased by more than 5 times. The method is simple and effective. The real-time temperature compensation of torque sensor has been realized, and the temperature stability of torque sensor has been improved.

Keywords: torque sensor; temperature compensation; piecewise linear interpolation method; sensitivity temperature coefficient

0 引言

在旋转动力系统中,扭矩是反映机械设备系统性能的重要参数。扭矩的测量与机械设备的工作效率、能耗、安全性以及运转寿命等性能有着密不可分的联系。扭矩传感器是感知扭转力矩并检测这种物理信号,再将其转换为电信

号的传感器。通过扭矩传感器对机械设备的扭矩进行测量,可以获取整个系统的性能参数,从而分析设备的性能状态,指导设备提高效率^[1]。

应变片式扭矩传感器在弹性轴上粘贴应变片,当被测物理量即扭矩作用在弹性轴上时,弹性轴的形变引起了应变片的形变,从而应变片的阻值发生了变化,再通过测量转

收稿日期:2021-12-27

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61274078)、中国纺织工业联合会“纺织之光”应用基础研究项目(J201608)资助

换电路将阻值的变化转换为电压信号的输出,电压信号的大小也就反映了扭矩的大小^[2]。应变片式扭矩传感器结构简单、精度高、性能稳定、灵敏度高、响应速度快、安装使用方便,已广泛应用到航空、机械、电力、化工、建筑、医学等领域。

由于半导体材料对周围的环境温度较为敏感,因此温度的变化会引起以硅为材料的应变片阻值的变化,进而导致应变片式扭矩传感器发生温度漂移现象,测量的精度和温度稳定性大大降低^[4]。温度补偿的方法有两种:其一,硬件方法;其二,软件方法。硬件方法存在价格高、电路复杂、补偿效果差等缺点,而软件方法具有成本低、补偿灵活、补偿效果良好等优点。本文对该传感器采用了基于分段线性插值法的软件补偿方法,使扭矩传感器具有温度自补偿功能。该方法温度补偿效果较佳。

1 应变片式扭矩传感器的工作原理

本文采用的应变片式扭矩传感器是目前国内外测量扭矩时使用最为普遍的一种传感器,在弹性轴表面贴上金属电阻应变片组成测量电桥,当弹性轴受到扭矩作用产生微小变形后引起电桥电阻值的变化,再将其转变为电压信号的变化从而实现扭矩测量。图 1 为应变片式扭矩传感器的结构图。

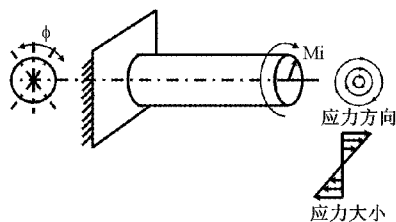


图 1 应变片式扭矩传感器结构图

弹性轴为圆截面,当弹性轴上承受扭矩 M_i 时,其表面主应力的方向与轴线成 45° 和 135° 角,主应力的绝对值等于横截面上的最大剪应力。因此在传感器的弹性轴横截面的圆周上,沿与轴线成 45° 和 135° 两个方向贴四片应变片,并将它们接成差动全桥^[4-5]。图 2 为应变片式扭矩传感器的贴片示意图。

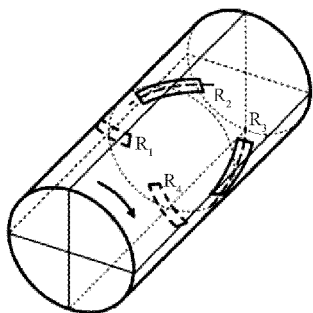


图 2 应变片式扭矩传感器贴片示意图

此时,在弹性轴表面产生的最大剪应力为:

$$\tau_{\max} = M_i / \left(\frac{J}{r} \right) \quad (1)$$

式中: M_i 为扭矩, r 为弹性轴横截面半径, J 为横截面对圆心的极惯性矩。

由应变片的工作原理可知:

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \epsilon \quad (2)$$

式中: ϵ 为当扭矩作用在弹性轴上时应变片受到的应变, C_1 为一个常数。

又由弹性力学虎克定律知, $\epsilon \propto \tau \propto M_i$, 由此可得:

$$\frac{\Delta R}{R} = C_2 M_i \quad (3)$$

上式表明,弹性轴上的扭矩大小 M_i 与应变片的阻值变化量 ΔR 成正比,将金属箔式应变片贴在垂直于应力方向,再将 4 个应变片接成惠斯通电桥,如图 3 所示,通过 4 根引线输出,通过万用表测量找出两根引出线之间电阻为 700Ω 的两组引线,作为全桥的两个对角,接入放大电路模块中。扭矩传感器输出的电压信号送到数字电压表,直接读取电压信号,其输出电压正比于弹性轴所受的扭矩,则可线性的反映出扭矩的变化。

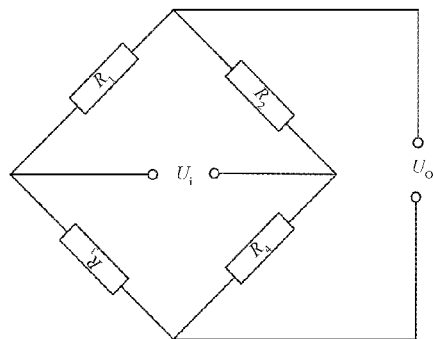


图 3 应变片式扭矩传感器全桥电路

2 分段线性插值法的温度补偿原理

分段线性插值法是根据精度要求把给定样本点分为多个不同区间,用若干段折线逼近曲线的方法。测量时,首先明确对应输入被测量 x_i 的电压值 u_i 所在的区间,然后根据该区间的线性表达式进行插值,即得输出值 $y_i = ku_i + b$ ^[6]。

记电压值 u_i 所在的线性段的区间为 $[u_k, u_{k+1}]$, 其对应的扭矩区间为 $[x_k, x_{k+1}]$, 在每个区间上输出线性表达式的通式为:

$$y_i = x_k + \frac{x_{k+1} - x_k}{u_{k+1} - u_k} (u_i - u_k) \quad (4)$$

式中: x_k 与 u_k 分别为采集到的扭矩与电压标定点数据, k 为标定点的序号, u_i 为待预测点的输入量, y_i 为线性插值法的预测输出扭矩值。

由电压值 u_i 求取预测扭矩值 y_i 的程序框图如图 4 所示。

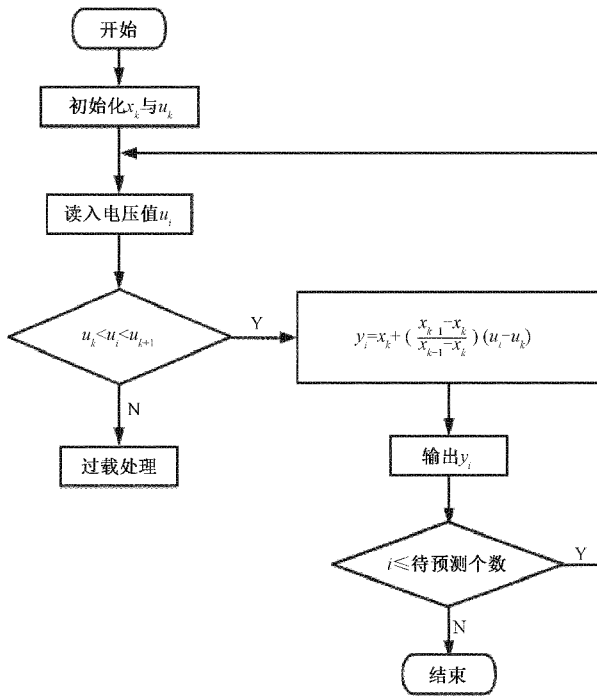


图4 分段线性插值法自校正流程

通过上述方法,建立了输入被测量 x_i 与电压值 u_i 的一一对应关系,将采集到的扭矩与电压标定点数据以表的形式嵌入到数据融合软件算法中,得到分段线性插值法预测的扭矩输出值 y_i 。最后,将输入被测量 x_i 与输出的预测扭矩值 y_i 存入数据表中,并由表绘制出应变片式扭矩传感器温度补偿前后的输入输出静态特性曲线,从而实现扭矩传感器的实时温度补偿。

分段线性插值法的运算量和插值误差较小,在运算速度和误差量之间取得了很好的平衡,插值函数具有连续性,但是由于在已知点的斜率是不变的,所以导致插值结果不光滑,存在角点。

表1 应变片式扭矩传感器的静态标定数据

$M/N \cdot M$	0.02	0.05	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	0.45	0.50	
$T/^\circ\text{C}$	U_T/V		U_M/V											
25	0.25	0.034	0.087	0.142	0.221	0.296	0.369	0.443	0.516	0.590	0.662	0.735	0.825	0.918
28	0.28	0.036	0.091	0.147	0.221	0.296	0.369	0.443	0.517	0.591	0.665	0.738	0.829	0.920
31	0.31	0.036	0.091	0.146	0.220	0.293	0.367	0.439	0.514	0.588	0.662	0.734	0.826	0.917
34	0.34	0.036	0.092	0.145	0.217	0.291	0.365	0.436	0.510	0.583	0.657	0.730	0.822	0.913
37	0.37	0.036	0.092	0.146	0.220	0.295	0.368	0.440	0.514	0.587	0.661	0.734	0.825	0.917
40	0.40	0.038	0.093	0.148	0.221	0.296	0.370	0.443	0.514	0.589	0.663	0.738	0.829	0.922
43	0.43	0.038	0.096	0.152	0.222	0.296	0.369	0.443	0.517	0.590	0.664	0.740	0.831	0.924
46	0.46	0.039	0.098	0.154	0.223	0.298	0.372	0.445	0.520	0.591	0.665	0.738	0.827	0.920
49	0.49	0.037	0.092	0.147	0.220	0.294	0.367	0.443	0.516	0.590	0.663	0.735	0.824	0.916
52	0.52	0.037	0.094	0.149	0.221	0.296	0.370	0.443	0.518	0.593	0.668	0.740	0.831	0.924
55	0.55	0.036	0.092	0.146	0.221	0.294	0.369	0.443	0.515	0.590	0.664	0.740	0.834	0.923
58	0.58	0.037	0.093	0.149	0.225	0.301	0.375	0.452	0.525	0.601	0.675	0.751	0.843	0.938
60	0.60	0.037	0.093	0.148	0.223	0.299	0.375	0.449	0.524	0.601	0.675	0.751	0.843	0.937

3 应变片式扭矩传感器的温度补偿

本文使用的温度补偿模型如图5所示。其中,输入信号来自智能传感器系统中的两个传感器:其一是待补偿的主传感器——应变片式扭矩传感器,另一个是监测温度干扰量的辅传感器。抗温度干扰的温度补偿模型基于分段线性插值法进行两传感器数据融合。根据采集的扭矩和温度的输入输出数据,经过二维标定实验,将数据传输进温度补偿模型中,得到最终的扭矩预测值,从而实现对温度的补偿。

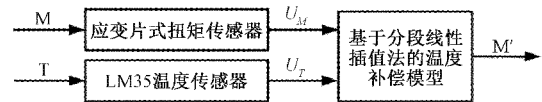


图5 应变片式扭矩传感器温度补偿系统框图

3.1 二维标定实验

本实验采用 THSRZ-2 型传感器系统综合实验装置中的应变片式扭矩传感器,并将 LM35 型温度传感器与应变片式扭矩传感器置于同一恒温箱中^[7]。应变片式扭矩传感器的量程范围为 $0 \sim 0.5 \text{ N} \cdot \text{M}$,工作温度范围为 $25^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$,在量程范围内确定 13 个扭矩标定点,在工作温度范围内确定 13 个温度标定点,测定该扭矩传感器的静态特性^[8]。扭矩传感器的输入与输出量分别为扭矩 M 和电压 U_M ,温度传感器的输入与输出量分别为温度 T 和电压 U_T 。

为保证实验数据的准确性,在恒温箱的温度达到每个温度标定点后,静置 20 min 以上,将砝码盘挂在测量横杆的不同刻度处,调零后再依次往砝码盘内加入 10 颗质量为 20 g 的砝码,并读取相应数字电压表的数值,直到 200 g 砝码加完,在此过程中扭矩 $M = F \cdot L = mgL$ 从 $0.01 \text{ N} \cdot \text{M}$ 增加到 $0.1 \text{ N} \cdot \text{M}$ 。然后依次从砝码盘内取出砝码,记录不同标定点在不同温度下扭矩传感器的输出电压。静态标定多组数据取平均值并整合后,得到数据如表1所示。

根据实验标定数据,分别绘制扭矩传感器的不同标定
点在不同温度下的输入(扭矩 M)输出(电压 U_M)曲线,如
图 6 所示^[9-10]。

由图 6 可知,在同一扭矩下,随着温度的升高,扭矩传
感器的输出电压上下随机浮动,总体呈增大趋势,出现了
较为明显的温度漂移现象

3.2 模型优化温度补偿及结果分析

为进一步提高扭矩传感器的温度稳定性,本文提出了
基于分段线性插值法的温度补偿模型。综合考虑要求精
度及算法效率,确定插值区间 12 个,全温范围内插值点
数为 $12 \times 13 = 156$ 个。

采用 MATLAB 软件计算模型中每个区间线性表达式
中的斜率和常数项参数,并存入数据表中。数据融合后得
到的扭矩预测值如表 2 所示。

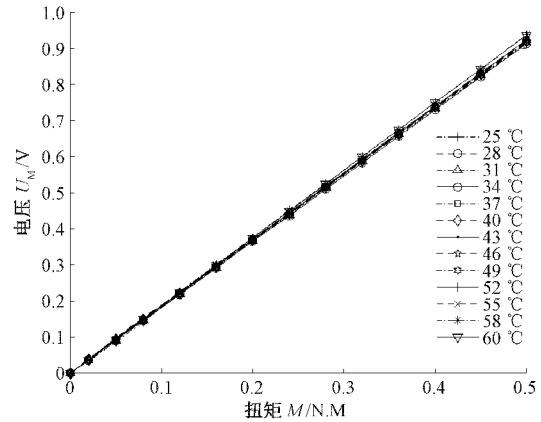


图 6 温度补偿前传感器的输入输出静态特性曲线

表 2 温度补偿后的扭矩预测值

$M/N, M$	0.02	0.05	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24	0.28	0.32	0.36	0.4	0.45	0.5
$T/^\circ\text{C}$	$M'/N, M$												
25	0.019 4	0.049 3	0.079 0	0.121 0	0.160 4	0.200 0	0.240 0	0.279 9	0.320 5	0.359 9	0.400 0	0.449 3	0.500 0
28	0.019 9	0.049 4	0.080 5	0.119 8	0.160 2	0.200 0	0.239 9	0.280 0	0.320 0	0.360 4	0.399 8	0.450 1	0.500 0
31	0.019 8	0.050 0	0.079 9	0.120 1	0.159 7	0.200 7	0.239 1	0.280 3	0.320 0	0.360 7	0.399 2	0.450 4	0.500 0
34	0.019 4	0.050 6	0.079 9	0.119 5	0.159 8	0.201 0	0.239 1	0.280 3	0.319 7	0.360 3	0.399 8	0.450 3	0.500 0
37	0.019 6	0.050 5	0.079 7	0.119 8	0.160 4	0.200 4	0.239 3	0.280 4	0.319 7	0.360 3	0.400 1	0.449 7	0.500 0
40	0.020 2	0.050 0	0.080 2	0.119 7	0.160 0	0.200 4	0.240 4	0.279 0	0.320 3	0.359 7	0.400 7	0.449 5	0.500 0
43	0.019 6	0.050 5	0.081 2	0.118 9	0.160 1	0.200 0	0.239 7	0.280 4	0.319 7	0.359 6	0.400 7	0.449 6	0.500 0
46	0.020 0	0.050 5	0.081 5	0.118 5	0.160 1	0.200 4	0.239 3	0.281 2	0.319 2	0.360 4	0.400 3	0.449 0	0.500 0
49	0.019 9	0.049 9	0.080 2	0.119 7	0.160 2	0.199 4	0.240 7	0.279 7	0.320 3	0.360 3	0.400 2	0.449 2	0.500 0
52	0.019 8	0.050 3	0.080 4	0.119 5	0.159 8	0.200 6	0.239 4	0.280 0	0.320 0	0.360 8	0.399 8	0.449 5	0.500 0
55	0.019 7	0.050 2	0.079 7	0.120 3	0.159 6	0.200 4	0.240 3	0.279 3	0.320 3	0.359 6	0.400 0	0.451 5	0.500 0
58	0.019 6	0.050 0	0.079 9	0.119 9	0.160 5	0.199 3	0.240 8	0.279 3	0.320 5	0.359 6	0.400 4	0.449 3	0.500 0
60	0.019 7	0.050 1	0.079 8	0.119 9	0.159 7	0.200 7	0.239 7	0.279 5	0.320 8	0.359 6	0.400 4	0.449 6	0.500 0

根据表 2 的预测数据绘制出扭矩传感器在温度补偿
后的输入(标定扭矩 M)输出(预测扭矩 M')曲线,如图 7
所示。

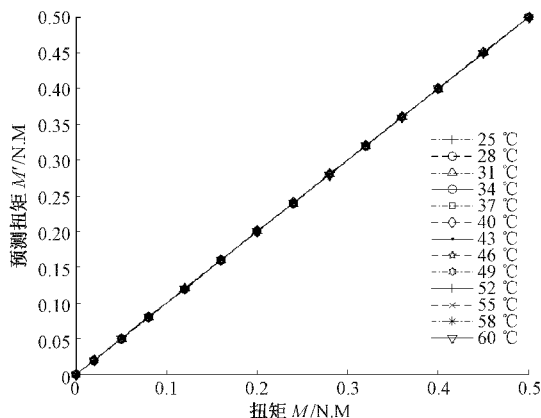


图 7 温度补偿后传感器的输入输出静态特性曲线

本文采用温度补偿前后的灵敏度温度系数 α_s 和满量
程下温度附加误差的相对值 δ 两个指标来评价温度稳定性
和测量精度的改善程度^[11-13]。灵敏度温度系数 α_s 表示灵
敏度随温度漂移的速度,即温度改变 1°C 时,灵敏度的相对
改变量的百分数。其补偿前后的计算公式为:

补偿前:

$$\alpha_s = \frac{\Delta U_m}{\Delta T \cdot U(FS)} \times 100\% \quad (5)$$

补偿后:

$$\alpha'_s = \frac{\Delta M_m}{\Delta T \cdot M(FS)} \times 100\% \quad (6)$$

式中: ΔT 为传感器的工作温度变化范围; $U(FS)$ 与
 $M(FS)$ 为量程; ΔU_m 与 ΔM_m 为当温度变化 ΔT 时,在全
量程范围中某一输入量对应输出值随温度漂移的最大改
变量。

由表 1 数据可知, $\Delta T = 60 - 25 = 35^\circ\text{C}$; 在扭矩为 0 时

有输出电压最小值 $U_{\min} = 0 \text{ V}$; 在温度为 $58 \text{ }^\circ\text{C}$, 扭矩为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{M}$ 时, 有输出电压最大值 $U_{\max} = 0.938 \text{ V}$, 则传感器量程 $U(FS) = U_{\max} - U_{\min} = 0.938 - 0 = 0.938 \text{ V}$ 。在扭矩为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{M}$ 时, 存在 $\Delta U_m = 0.938 - 0.913 = 0.025 \text{ V}$ 。由式(5)计算出温度补偿前系统的灵敏度温度系数为:

$$\alpha_s = \frac{\Delta U_m}{\Delta T \cdot U(FS)} = \frac{0.025}{35 \times 0.938} = 7.615 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C} \quad (7)$$

补偿前该传感器在满量程下温度附加误差的相对值为:

$$\delta = \frac{\Delta U_m}{U(FS)} \times 100\% = \frac{0.025}{0.938} = 2.67\% \quad (8)$$

由表2的补偿后数据可知, 在 $\Delta T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, 预测值围绕扭矩标定值随机偏离, 满量程 $M(FS) = 0.5 \text{ N}\cdot\text{M}$ 。在标定扭矩为 $0.08 \text{ N}\cdot\text{M}$ 时, 两个温度点预测值的最大偏差 $\Delta M_m = M_{\max} - M_{\min} = 0.0815 - 0.0790 = 0.0025 \text{ N}\cdot\text{M}$ 。由式(6)计算出温度补偿后系统的灵敏度温度系数为:

$$\alpha'_s = \frac{0.0025}{(60 - 25) \times 0.5} = 1.429 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C} \quad (9)$$

补偿后该传感器在满量程下温度附加误差的相对值为:

$$\delta' = \frac{\Delta M_m}{M(FS)} \times 100\% = \frac{0.0025}{0.500} = 0.5\% \quad (10)$$

将式(7)、式(8)与式(9)、式(10)进行对比(即将补偿前后进行对比)可知: 灵敏度温度系数 α_s 由 $7.615 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 提升至 $1.429 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, 温度附加误差相对值由 2.67% 提升至 0.5% , 均提升了5倍以上。传感器的温度稳定性得到了一定程度的改善, 有效抑制了温度干扰量对该传感器的影响。

4 结 论

本文针对应变片式扭矩传感器的温度漂移, 建立基于分段线性插值法的温度补偿模型, 分析扭矩传感器输出测量电压随温度变化的关系, 利用采集的扭矩和温度信息, 通过软件算法实时矫正该传感器扭矩随温度的漂移, 并对补偿前后的灵敏度温度系数进行了对比。实验结果表明, 利用分段线性插值法补偿后的灵敏度温度系数由 $7.615 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 提升至 $1.429 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, 温度附加误差相对值由 2.67% 提升至 0.5% , 均提升了5倍以上。该方法简单有效, 实现了扭矩传感器的实时温度补偿, 提高了扭矩传感器的温度稳定性, 在应变片式扭矩传感器中具有很好的应用价值, 可进一步推广用于其他传感器的温度补偿。

应变片式扭矩传感器能够测量各种扭矩、转速及机械效率, 适用于汽车电动助力转向、船舶推进主轴扭矩检测、石油钻探扭杆等机械传动中需要测量扭矩和计算功率的场合, 能够快速响应并且精确地进行应用。本文提出基于

分段线性插值法的温度补偿模型能有效对温度进行补偿, 抑制温度造成的影响, 提高扭矩测量精度, 符合实际应用领域的需求^[14-15]。

参考文献

- [1] 巴军. 环型空间阵列扭矩传感器测量系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009, DOI: 10.7666/d.y1663875.
- [2] 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.
- [3] 杨国升, 杨雨豪, 武彩生. 温度对扭矩测量精度影响因素简析[J]. 大众标准化, 2019(1): 22-26.
- [4] 文西芹, 张永忠. 扭矩传感器的现状与发展趋势[J]. 仪表技术与传感器, 2001, 43(12): 1-3.
- [5] 廖丽媛, 卢文科. 基于单片机的扭矩测量系统的设计[J]. 仪表技术, 2013(3): 12-15.
- [6] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010, DOI: 10.3969/j.issn.1008-2298.2012.01.003.
- [7] 郭志君, 卢文科, 左锋, 等. 基于NSGA-II & BP的应变片式压力传感器温度补偿研究[J]. 中国测试, 2020, 46(6): 72-77.
- [8] RYUICHIRO K, SHO S, TOSHIKI T, et al. Hysteresis compensation in force/torque sensors using time series information[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4259-4259.
- [9] HOU Y L, ZENG D X, YAO J T, et al. Optimal design of a hyperstatic Stewart platform-based force/torque sensor with genetic algorithms [J]. Mechatronics, 2008, 19(2): 199-204.
- [10] NGHIA D, OLFA K. Temperature-compensated force/pressure sensor based on multi-walled carbon nanotube epoxy composites[J]. Sensors, 2015, 15(5): 11133-111350.
- [11] 罗华, 苟志平, 冉龙明, 等. 基于插值法的MEMS陀螺温度补偿方法[J]. 压电与声光, 2021, 43(4): 562-565.
- [12] 钦志伟, 卢文科, 左锋, 等. 霍尔效应式位移传感器的温度补偿[J]. 传感技术学报, 2019, 32(7): 1040-1044.
- [13] 廖丽媛. 基于应变式扭矩传感器的测量系统的设计[D]. 上海: 东华大学, 2013, DOI: CNKI:CDMD:2.1013.161550.
- [14] 柴继新, 王恩锋, 范小燕, 等. 几种常见的电阻应变式旋转扭矩传感器[J]. 计测技术, 2010, 30(2): 34-36.
- [15] 陈玮浩, 姜佳怡, 赵帅, 等. 一种实用的扭矩传感器校准方法[J]. 信息技术与信息化, 2019(9): 36-39.

作者简介

张紫嫣, 硕士, 主要研究方向为智能传感器技术。

E-mail: 497845941@qq.com

卢文科, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为声表面波、小波变换、传感器理论与技术等。

E-mail: luwenke3@163.com

左锋, 博士, 工程师, 主要研究方向为工程检测与自动化装置。

丁勇, 博士, 主要研究方向为智能传感器技术。

E-mail: amalgam_dy@sina.com