

## 应变式负荷传感器温度补偿研究

陈宝伟<sup>1</sup>, 王学影<sup>1</sup>, 姚进辉<sup>2</sup>, 郭斌<sup>1</sup>

(1. 中国计量学院 计量测试工程学院, 杭州 310018; 2. 福建省计量科学研究院, 福州 350003)

**摘要:** 针对应变式负荷传感器容易受环境温度变化的影响, 对其受温度变化的影响机理进行了研究, 建立了温度补偿数学模型; 研究表明应变式负荷传感器的输出是与载荷和温度大小有关的多元曲线, 即包含 2 条曲线: 曲线 1 是温度不变时的“载荷—输出”, 曲线 2 是载荷不变时的“温度—输出”; 经过实验验证, 在经过 4 次拟合补偿修正后, 曲线 1 的输出示值误差由  $\pm 0.15\%$  减少到  $\pm 0.006\%$ , 而曲线 2 减少到  $\pm 0.009\%$ ; 因此, 选用曲线 1 拟合修正温度补偿方法, 并通过实际的应用验证了该方法的有效性和可靠性。

**关键词:** 应变式; 负荷传感器; 温度补偿; 最小二乘法; 拟合曲线

## Research on Temperature Compensation of Strain Type Load Cell

Chen Baowei<sup>1</sup>, Wang Xueying<sup>1</sup>, Yao Jinhui<sup>2</sup>, Guo Bin<sup>1</sup>

(1. College of Metrology and Test, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Metrology Institute of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** In view of the influence of strain gauge load cell is easily affected by the change of environment temperature, study the mechanism of temperature change of the variable load cell, and establish the mathematical model of temperature compensation. Studies have shown that the output of the strain load cell is the multi curve which is related to the load and the temperature. The curve 1 is the "load—output" when the temperature is constant, and the curve 2 is the "temperature—output" when the load is constant. After the experimental verification, the output of the curve of the output value of the curve 1 is reduce from  $\pm 0.15\%$  to  $\pm 0.006\%$ , while the curve 2 is reduce to  $\pm 0.009\%$  by 4 fitting. Therefore, select the curve 1, and through the practical application of the method to verify the validity and reliability of the method.

**Keywords:** strain gauge; load cell; temperature compensation; least square method; fitting curve

## 0 引言

负荷传感器广泛应用于石油、化工、建材、航空航天、高校及科研院所等行业, 用于力值的量值传递、溯源以及各种工作器具的测量。由于在使用时经常会遇到强烈的温度变化和外部附加载荷以及环境变化的影响, 造成示值的不稳定<sup>[1]</sup>。选用合适的温度补偿方法可以在很大程度上减少温度变化带来的误差, 提高应变式负荷传感器的测量精度和可靠性。

国内外已有大量文献针对该问题开展研究, 目前主要有硬件补偿和软件补偿两种方法。在硬件补偿中, 通常应用电路补偿进行温度补偿<sup>[2-3]</sup>, 该方法难以做到全程补偿, 并且所用的补偿电路的漂移会影响整个测量系统的精度<sup>[4]</sup>。而软件补偿主要有采用二元线性插值<sup>[5]</sup>、RBF 神经网络<sup>[6]</sup>、LS-SVM<sup>[4]</sup>和 MAX1452 温度调理芯片<sup>[7]</sup>等方法实现温度补偿。这与本文的数学方法有类似之处, 但这些研究均未涉及输出与温度和载荷大小之间的关系。

## 1 应变式负荷传感器的温度影响机理

如图 1 所示, 应变式负荷传感器的基本原理是在弹性元件上粘贴电阻应变敏感元件, 当外力作用在弹性元件上时, 弹性

元件的变形引起应变敏感元件(简称应变片)也产生变形, 并表现为电阻值的变化, 通过惠斯通全桥电阻—电压转换电路将其转变成电量输出, 电量变化的大小反映了应变的大小。但应变片对温度变化十分敏感。当环境温度变化时, 因应变片的线膨胀系数与弹性元件的线膨胀系数不同, 且应变片电阻值随温度的变化而变化, 所以测得应变将包含温度变化的影响, 不能反映弹性元件的实际应变, 温度产生的附加应变如式(1)所示。

$$\epsilon_t = \alpha \Delta t + K(\beta_t - \beta_g) \Delta t \quad (1)$$

其中:  $\epsilon_t$  为温度变化  $\Delta t$  时的附加应变;  $\alpha$  为应变片的温度系数;  $K$  为应变片灵敏系数;  $\beta_t$  为弹性元件材料线膨胀系数;  $\beta_g$  为应变片敏感栅材料线膨胀系数。

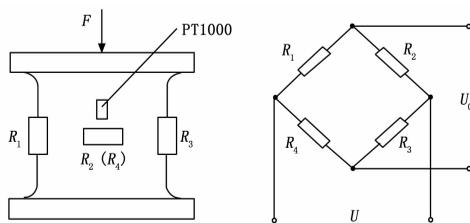


图 1 应变式负荷传感器的基本原理图

基于以上的应变式负荷传感器温度影响机理, 在其弹性体上加贴 PT1000 铂热电阻温度传感器, 以便实时采集应变式负荷传感器的弹性元件温度。

## 2 温度补偿数学模型

在环境温度变化的影响下, 负荷传感器的输出  $F$  不仅是施

收稿日期: 2015-08-20; 修回日期: 2015-09-17。

基金项目: 省科技计划项目(2015C31081)。

作者简介: 陈宝伟(1989-), 男, 福建漳州人, 硕士研究生, 主要从事传感器与自动化检测方向的研究。

王学影(1979-), 女, 黑龙江大庆人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事光电检测、坐标测量技术方向的研究。

加载荷  $m$  的函数,同时也是温度  $t$  的函数。当对应变式负荷传感器施加标准载荷  $m$  时其输出为:

$$F_i = f(m_i, t) \quad (2)$$

其中:  $F_i$  为标准载荷  $m$  作用下, 温度补偿前应变式负荷传感器的输出。

应变式负荷传感器标定时, 依据 JJG 391-2009 《力传感器检定规程》<sup>[8]</sup> 中的规定, 将试验用应变式负荷传感器放入高低温箱中, 设定高低温箱温度为 20 °C, 选择若干个检测点进行标定, 得到其输出为:

$$F_i |_{t=20} = f(20) \quad (3)$$

对应变式负荷传感器施加标准载荷, 改变高低温箱温度, 在各标定点测得不同温度下的输出

$$F_i = f(t_i) \quad (4)$$

利用最小二乘法的多项式拟合算法对不同温度下的应变式负荷传感器输出进行曲线拟合, 得到  $P_i = \sum_{k=0}^n a_{ik} t^k$  或  $P_i = \sum_{k=0}^n a_{ik} m^k$ , 式中  $a_{ik}$  为多项式的拟合系数,  $k$  为多项式的次数。以应变式负荷传感器标定时温度为基准, 温度补偿量  $\Delta P_i$  为:

$$\Delta P_i = F_i |_{t=20} - P_i \quad (5)$$

温度补偿修正后应变式负荷传感器的输出为:

$$F_i^{out} = F_i + \Delta P_i \quad (6)$$

### 3 温度数据检测实验

在一台型号为 LC-7, 量程为 300 kN 的 0.02 级应变式负荷传感器上, 用 1 MN 的力标准机, 在室温 20 °C 下对其施加 30 kN、150 kN、210 kN 和 300 kN 的标准载荷, 进行传感器的标定。考虑到应变式负荷传感器在使用时并非完全定点 (固定温度  $t$  及载荷  $F$ ), 因而在实验检测时, 除了检测标定的载荷点外, 还在之间随机增加的 2 个载荷点 (90 kN 和 270 kN) 进行插值验证。标定完后, 分别在 -10 °C、0 °C、10 °C、20 °C、30 °C 和 40 °C 温度点下对其进行检测, 温度补偿前的检测数据见表 1。

表 1 温度补偿前检测值

检测点 (kN)	温度/(°C)					
	-10	0	10	20	30	40
	检测值(kN)					
30	30.0412	30.0327	30.0133	30.0007	29.9863	29.9771
90	90.1265	90.1135	90.0537	90.0031	89.9602	89.9368
150	150.1641	150.1531	150.0628	150.0056	149.9402	149.9182
210	210.2006	210.1897	210.0725	210.0079	209.9153	209.8935
270	270.2567	270.2362	270.0837	270.0083	269.8953	269.8512
300	300.3107	300.2791	300.1076	300.0037	299.8764	299.8459

根据表 1 中的数据, 计算出在各个温度点下的输出与标准载荷的差值, 并绘出对应的图形, 如图 2 所示。由图 2 可见, 不论在哪个检测点下, 其输出皆随温度的增高而逐渐变小, 说明实验所用的应变式负荷传感器的温度系数是负的, 并且其温度影响示值误差在  $\pm 0.15\%$  以内。

### 4 温度不变时输出随载荷的变化

利用表 1 中的数据, 采用最小二乘法的多项式拟合算法,

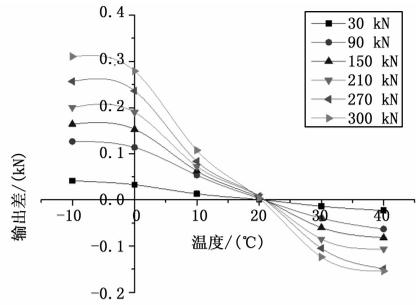


图 2 温度补偿前的输出差

在各个温度点下拟合输出随载荷变化的曲线 1。理论上实验检测了 6 个载荷点的值, 最多可以拟合 5 次多项式方程, 然而用最小二乘法进行多项式拟合, 当拟合多项式的次数较高时, 其所需计算的正规方程组往往是病态的, 而且随着阶数越高, 病态越严重。在经过计算后发现, 表 1 中的数据在进行 5 次拟合时已经出现严重的病态, 所以最多只能进行 4 次拟合。

经过多项式拟合后利用式 (6) 对输出进行温度补偿修正, 图 3 绘出了经过 1~4 次拟合修正后在 40 °C 下的示值误差。从图 3 中可以发现随着拟合次数的增加, 应变式负荷传感器的输出示值误差逐渐减小了。

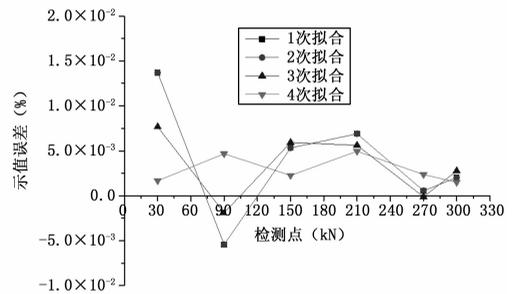


图 3 分别用 1~4 次拟合修正后的示值误差 (40 °C)

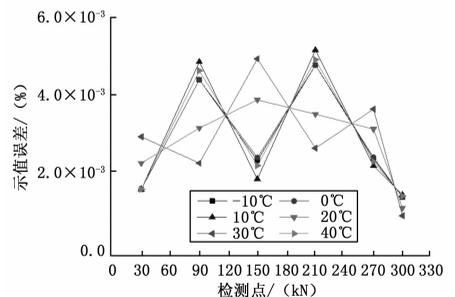


图 4 采用 4 次拟合修正后示值误差 (温度不变)

由此, 笔者进一步对各个温度下的输出值进行 4 次拟合修正, 结果如图 4 所示。可以发现经过 4 次拟合修正后, 应变式负荷传感器的输出示值误差在  $\pm 0.006\%$  以内, 比温度补偿修正之前的  $\pm 0.15\%$  有了明显的减小。

4 次多项式拟合方程的各项系数, 拟合后的剩余平方和及相关系数见表 2。由此可以计算出在任何载荷下的应变式负荷传感器的输出修正值。对于非检测点下的输出修正值可以借助于已经拟合出的方程, 采用内插法进行计算。

### 5 载荷不变时输出随温度的变化

同样在载荷不变的情况下, 拟合出应变式负荷传感器的输

表 2 温度不变时 4 次拟合方程的各项系数、剩余平方和及相关系数

温度/(°C)	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	剩余平方和	相关系数
-10	-0.02802	1.00269	1.333E-05	2.665E-08	1.415E-12	1.3 E-05	1.0000
0	-0.02930	1.00238	-1.072E-05	2.024E-08	1.629E-12	1.2 E-05	1.0000
10	-0.01958	1.00128	-5.957E-06	5.951E-09	1.463E-11	2.4E-05	1.0000
20	-0.00289	1.00016	-1.832E-06	1.007E-08	1.848E-11	1 E-07	1.0000
30	-0.00239	0.99965	-1.266E-06	9.388E-09	1.902E-11	1.3E-05	1.0000
40	-0.03310	0.99752	2.347E-05	-1.019E-07	1.475E-10	1.6 E-05	1.0000

表 3 载荷不变时 4 次拟合方程各项系数、剩余平方和及相关系数

检测点/(kN)	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	剩余平方和	相关系数
30	30.03187	-0.00150	-3.481E-05	1.844E-06	-2.229E-08	7 E-05	0.9978
90	90.11210	-0.00437	-1.953E-04	8.553E-06	-9.208E-08	2 E-05	0.9994
150	150.14821	-0.00584	-2.811E-04	1.213E-05	-1.267E-07	2.4E-04	0.9956
210	210.18139	-0.00700	-3.444E-04	1.347E-05	-1.252E-07	6.9 E-04	0.9920
270	270.22539	-0.00957	-4.115E-04	1.894E-05	-2.138E-07	1.2 E-03	0.9918
300	300.26899	-0.01118	-4.689E-04	1.934E-05	-1.819E-07	1 E-03	0.9947

表 4 衡器载荷测量仪与砝码比对结果

加载位置	$x$ 补偿前 示值误差	$x$ 补偿后 示值误差	砝码测量值 $X$ 示值误差/(kg)	衡器载荷测量仪测量 不确定度 $U(k=2)$ /(kg)	砝码测量不确 定度 $U(k=2)$ /(kg)	$E_n$ 补偿前	$E_n$ 补偿后
1	-22	-17	-14	5.3	2.7	1.34	0.50
2	-18	-13	-8	5.3	2.7	1.68	0.84
3	-16	-11	-6	5.3	2.7	1.68	0.84
4	-19	-13	-8	5.3	2.7	1.85	0.84
5	-9	-3	+2	5.3	2.7	1.85	0.84
6	-22	-14	-15	5.3	2.7	1.18	0.17

出随温度变化的曲线 2, 利用式 (6) 对输出进行补偿修正, 在 30 kN 检测点下分别用 1~4 次拟合修正后的结果如图 5 所示。从图中可以看出在 20 °C 时 4 次拟合反而比 1~3 次拟合时的示值误差更大, 这是因为实验所用的应变式负荷传感器是在 20 °C 下标定的, 传感器的特性是在标定的温度下的值是很准确的, 其输出值随载荷的变化关系接近于正比, 即线性关系, 所以在 20 °C 下 1 次线性拟合时的示值误差反而最小。

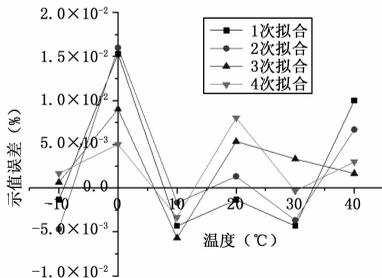


图 5 分别用 1~4 拟合修正后示值误差 (30 kN 检测点)

进一步对 4 次拟合时的各检测点的输出进行修正, 结果如图 6 所示。可以发现经过修正后, 示值误差在  $\pm 0.009\%$  以内。同样比补偿修正之前的  $\pm 0.15\%$  有了明显的减小, 但是较温度不变时拟合修正的结果大。

4 次多项式拟合方程的各项系数, 拟合后的剩余平方和及相关系数见表 3。由此可以计算出在任何温度点下的应变式负荷传感器的输出修正值。对于非检测温度点下的输出修正值可

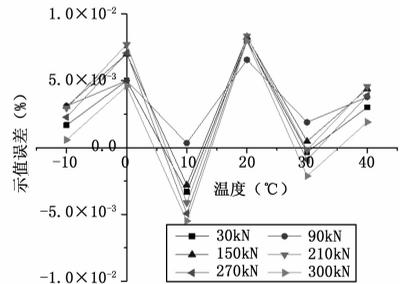


图 6 采用 4 次拟合修正后示值误差 (载荷不变)

以借助于已经拟合出的方程, 采用内插法进行计算。

## 6 现场实际应用

根据以上的研究, 选用曲线 1 拟合修正的方法, 将其应用于福建省计量科学研究所研制的衡器载荷测量仪 (由应变式负荷传感器和油缸组成) 上, 通过开展的与砝码进行福建省内电子汽车衡比对试验, 应用于现场检测电子汽车衡。

比对试验在福建省内已经对几十台电子汽车衡进行检测, 现在选取其中的一台进行说明。比对结果见表 4。由表 4 可知, 当没有对衡器载荷测量仪进行温度补偿时, 其与砝码分别检测电子汽车衡的偏载项目, 所检项目  $E_n > 1$ , 比对结果不满意。而对衡器载荷测量仪进行温度补偿后, 所检项目的  $E_n \leq 1$ , 比对结果满意。

(下转第 337 页)