

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.007

非侵入式翼伞组提带张力传感器温度补偿的研究

齐贺轩¹, 郭瑞鹏¹, 赵敏¹, 姚敏¹, 卢章树², 戚晓玲²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106;

2. 航宇救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441002)

摘要:为保证非侵入式翼伞组提带张力传感器在高空环境下测量的准确性,提出一种基于三次样条插值与最小二乘法相结合的温度补偿算法对张力传感器进行温度补偿,其温度补偿范围为 $-40^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。使用恒温箱、标准拉力机等试验装置进行温度补偿试验。试验结果表明:本文提出的温度补偿算法能够有效地解决传感器因工作环境温度的变化导致 0 点漂移和灵敏度漂移的问题。

关键词:张力传感器;翼伞组提带;温度补偿;三次样条插值;最小二乘法

中图分类号:TP212.1⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0035-05

Research on Temperature Compensation for Non-invasive Tension Sensor of Parachute Lifting Belt

QI Hexuan¹, GUO Ruipeng¹, ZHAO Min¹, YAO Min¹, LU Zhangshu², QI Xiaoling²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Aerospace Life-Support Industries Co., Ltd., Xiangyang 441002, China)

Abstract:To ensure the accuracy of non-invasive parachute lifting belt tension sensor in high-altitude environments, this paper proposes a temperature compensation algorithm based on a combination of cubic spline interpolation and least squares method for temperature compensation of the tension sensor, with temperature compensation ranging -40°C to 30°C . The temperature compensation experiment was conducted using experimental devices such as a constant temperature box and a standard tensile machine. The experimental results show that the designed temperature compensation algorithm can effectively solve the problems of zero drift and sensitivity drift caused by changes in the working environment temperature of the sensor.

Keywords:tension sensor; parachute lifting belt; temperature compensation; cubic spline interpolation; least square method

0 引言

翼伞是一种新型的可控飞行器^[1],从民用的高空跳伞等休闲娱乐活动到军事任务中的物资人员投送^[2],甚至在更高空的航天宇航任务中,都有着翼伞的身影^[3]。组提带是翼伞系统中用来连接背带与伞体之间的承力伞带^[4]。在翼伞打开瞬间以及飞行过程中,组提带将受到较大的张力,并且有多种因素影响组提带张力的变化,如翼伞的形状、翼伞的飞行姿态以及其所处环境的温度、气压、风向等^[5]。因此,实时检测翼伞组提带所受张力大小成为翼伞结构设计以及安全性设计中的一个重要因素^[6]。

为了实现空投过程中翼伞组提带张力的无损测量,设计了一款大量程的非侵入式翼伞组提带张力传感器系统,该系统包括传感器和信号采集

系统,并且该系统在常温下的满量程测量精度为 2%,灵敏度为 0.127mV/N ,采样频率为 2kHz 。但翼伞在高空降落到地面的过程中环境温度变化较大^[7],这会导致传感器系统的测量精度受到影响,因此需要对该系统进行温度补偿来减小温度对该系统的影响,提高测量精度。目前常用的温度补偿方法主要有硬件补偿^[8]和软件补偿^[9]两种方法,相较于硬件补偿,软件补偿方法的精度和灵活度更高、通用性更强,更易于在实际工程中应用,因此软件温度补偿方法越来越受到重视。

1 传感器设计

所设计的非侵入式翼伞组提带张力传感器结构如图 1 所示。其采用分体式中心对称结构,由两个受力梁和 3 个受力柱组成,两个受力梁通过 3 根受力柱连接,两个受力梁通过开孔的方法增

基金项目:航空科学基金项目(20182952029)

第一作者简介:齐贺轩(1996—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为传感器,hexuan688@163.com。

大该段截面的最大应变并用以粘贴应变片。该结构不会破坏翼伞组提带的完整性,可实现组提带张力的无损测量。

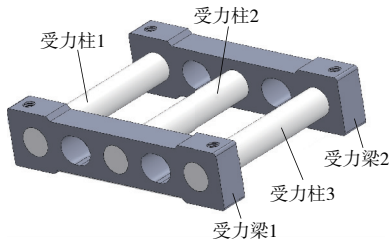


图1 传感器弹性体结构图

张力传感器的制作材料选用具有高弹性极限和弹性模量的40CrNiMo,满量程为25 kN,整体尺寸为86 mm×69 mm×20 mm。

2 传感器采集系统的设计

翼伞组提带张力传感器信号采集系统主要作用是完成张力信号的采集、数据处理、数据存储和环境温度采集等功能。它主要包括主控芯片、放大电路、存储模块、稳压电路及温度传感器等部分。传感器系统如图2所示。

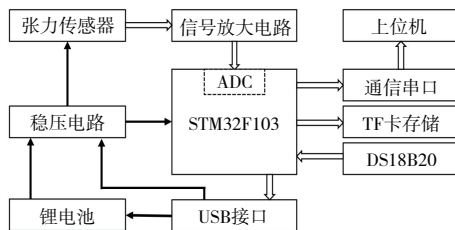


图2 传感器系统框图

张力信号采集系统采用低功耗、抗干扰能力强的32位微处理器STM32F103C8T6作为系统的主控芯片^[10],选用DS18B20数字温度传感器来检测系统环境温度,选用仪表放大器INA333将传感器输出的微弱信号放大至ADC能够分辨识别的大小,选用TPS79333作为稳压芯片将锂电池3.7 V电压转为3.3 V电压,并为系统中的器件供电。该信号采集系统工作流程如图3所示。

3 传感器温度补偿原理与算法

3.1 温度补偿原理

本文对非侵入式翼伞组提带张力传感器的软件温度补偿主要为0位和灵敏度补偿,软件温度补偿流程如图4所示。

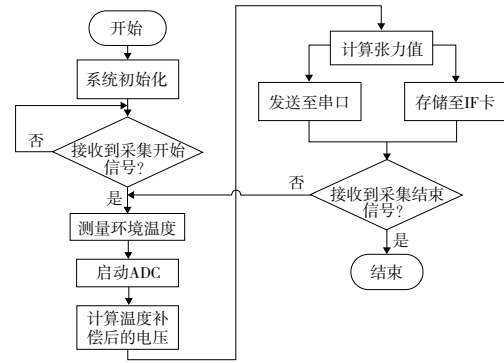


图3 信号采集系统工作流程图

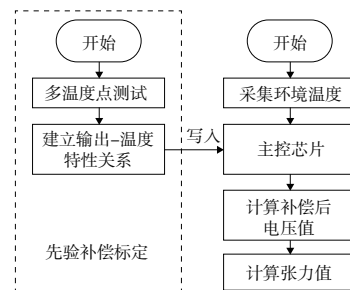


图4 软件温度补偿流程图

该温度补偿算法主要针对输入输出关系为线性的传感器^[11]。其原理是设被测量张力为 T ,在室温下传感器的灵敏度为 k_{RT} ,0位输出为 l_{RT} ,则传感器在室温下的输出为

$$U_{RT} = k_{RT} \times T + l_{RT} \quad (1)$$

则在温度为 t 时,无温度补偿时传感器的输出为:

$$U_t = k_t \times T + l_t \quad (2)$$

$$k_t = k_{RT} + \alpha(t - t_{RT}) \times Y_{FS} \quad (3)$$

$$l_t = l_{RT} + \beta(t - t_{RT}) \times Y_{FS} \quad (4)$$

式中: α 为灵敏度温度系数,在数值上等于温度变化1℃时,灵敏度的改变量与量程 Y_{FS} 之比; β 为0位温度系数,在数值上等于温度改变1℃时,0位值的改变量与量程 Y_{FS} 之比。

由式(1)一式(4)可得出:

$$T = \frac{U_t - [l_{RT} + \beta(t - t_{RT}) \times Y_{FS}]}{k_{RT} + \alpha(t - t_{RT}) \times Y_{FS}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)并整理,可得到温度为 t ℃时,经温度补偿后的输出电压 U'_t 为

$$U'_t = l_{RT} + \frac{U_t - l(t)}{k(t)} \times k_{RT} \quad (6)$$

3.2 三次样条插值

目前常用的插值算法有拉格朗日插值法、线性插值法和三次样条插值法。对于拉格朗日插值

法,若插值多项式次数过高时会出现龙格现象^[12];分段线性插值法将每两个相邻的节点用直线连起来,如此形成的一条折线就是分段线性插值函数,但该方法在端点处不光滑,无法准确反映出传感器的静态特性。

三次样条曲线插值的方法是目下使用较为广泛的一种方法,它是由一段连续的三次多项式连接而成,在连接点处一阶、二阶可导,且导数连续,具有良好的光滑性,能够准确反映传感器的真实特性^[13]。

设有已知函数 $f(x)$ 在区间 $[c, d]$ 上有 $n+1$ 个插值节点, $c=x_0 < x_1 < \dots < x_{n+1}=d$ 处的函数值为 $y_i=f(x_i)$,设函数

$$S(x) = \begin{cases} S_1(x), & x \in [x_1, x_2] \\ \vdots \\ S_i(x), & x \in [x_i, x_{i+1}] \\ \vdots \\ S_n(x), & x \in [x_n, x_{n+1}] \end{cases} \quad (7)$$

由三次样条插值的连续性,得:

$$S_i(x_i) = f(x_i) = y_i \quad (8)$$

$$S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1}) \quad (9)$$

因三次样条插值函数在每一个小区间上都具有二阶导数且导数连续,可得:

$$S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1}) \quad (10)$$

$$S''_i(x_{i+1}) = S''_{i+1}(x_{i+1}) \quad (11)$$

设在区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 有:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x-x_i) + c_i(x-x_i)^2 + d_i(x-x_i)^3 \quad (12)$$

$$m_i = S''_i(x_i) \quad (13)$$

$$m_{i+1} = S''_{i+1}(x_{i+1}) \quad (14)$$

式中 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 分别为零次项、一次项、二次项和三次项系数,则:

$$S'_i(x) = b_i + 2c_i(x-x_i) + 3d_i(x-x_i)^2 \quad (15)$$

$$S''_i(x) = 2c_i + 6d_i(x-x_i) \quad (16)$$

通过以上公式可以得出:

$$\begin{cases} a_i = y_i \\ b_i = \frac{y_{i+1}-y_i}{h_i} - \frac{m_i}{2}h_i - \frac{m_{i+1}-m_i}{6}h_i \\ c_i = \frac{m_i}{2} \\ d_i = \frac{m_{i+1}-m_i}{6h_i} \end{cases} \quad (17)$$

式中 h_i 为插值步长,其值为

$$h_i = x_{i+1} - x_i \quad (18)$$

将式(17)代入式(10)和式(11)中,整理得

$$m_i h_i + 2m_{i+1}(h_{i+1} + h_i) + m_{i+2} h_{i+1} = 6 \left(\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \right) \quad (19)$$

式中 $i=1, 2, \dots, n-2$ 。结合三次样条插值的自然边界条件

$$m_0 = m_n = 0 \quad (20)$$

得出 $n-2$ 个方程组,由此得出 $m_0 = m_n$ 的值,从而得出三次样条插值函数 $S(x)$ 。

4 试验分析与处理

采用上述自制的翼伞组提带张力传感器和张力的信号采集系统进行试验,使用DS18B20温度传感器检测系统环境温度。温度补偿标定范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,张力测定范围为 $0 \sim 25\text{ kN}$ 。

在进行温度补偿前需对传感器全温度范围内的静态特性进行标定。假定室温为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,在该温度下对其进行线性拟合,得到输出电压 U_{RT} 与输入张力 T 的线性关系为

$$U_{\text{RT}} = k_{\text{RT}} \times T + l_{\text{RT}} = 0.127\ 5 \times T + 55.27 \quad (21)$$

随后将传感器用保温材料包裹,置于恒温箱中,分别将恒温箱温度设置为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这4个温度点,为确保传感器温度能稳定到恒温箱设置温度,需将温度传感器置于恒温箱中 $3 \sim 4\text{ h}$,并在上位机实时监测DS18B20温度传感器数值。

待时间结束且温度数值达到恒温箱设定温度值,则将传感器快速取出并安装到标准拉力机上进行拉力测试。完成拉力试验后需将传感器静置于常温环境中 2 h ,待传感器温度变为室温后方可进行下一个温度点的测试。测试结果如表1所示。

表1 不同温度传感器系统测得输出电压

张力/N	输出电压/mV				
	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$30\text{ }^{\circ}\text{C}$
0	4.0	5.6	6.4	7.3	11.0
2 500	353.0	356.0	359.0	360.0	368.0
5 000	674.0	683.0	682.0	691.0	706.0
7 500	993.0	1 004.0	1 002.0	1 016.0	1 033.0
10 000	1 302.0	1 321.0	1 318.0	1 334.0	1 352.0
12 500	1 607.0	1 629.0	1 318.0	1 646.0	1 663.0
15 000	1 909.0	1 936.0	1 942.0	1 956.0	1 977.0
17 500	2 210.0	2 242.0	2 250.0	2 267.0	2 292.0
20 000	2 500.0	2 545.0	2 560.0	2 578.0	2 603.0
22 500	2 793.0	2 850.0	2 866.0	2 885.0	2 915.0
25 000	3 093.0	3 150.0	3 167.0	3 191.0	3 219.0

将上述数据用最小二乘法拟合,得到各温度点对应的拟合曲线,如图5所示。

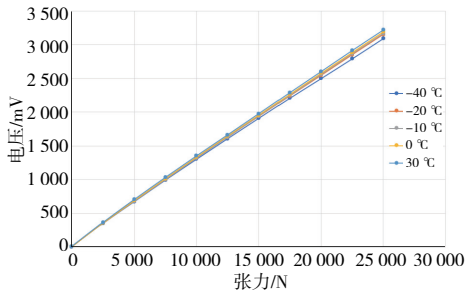


图5 不同温度下传感器输入输出关系

根据拟合曲线可得到不同温度时的灵敏度系数和0位输出,如表2所示。

表2 传感器在各温度点的灵敏度系数和0位输出

温度/℃	灵敏度系数 k	0位输出 b
-40	0.122 6	52.36
-20	0.125 0	48.42
-10	0.125 8	44.45
0	0.126 6	48.14
30	0.127 5	55.27

对 k 、 l 与 t 分别用最小二乘法拟合与三次样条插值进行处理,处理结果分别如图6、图7所示。

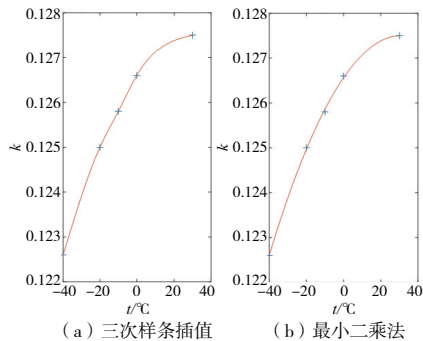


图6 两种方法对灵敏度系数的拟合结果图

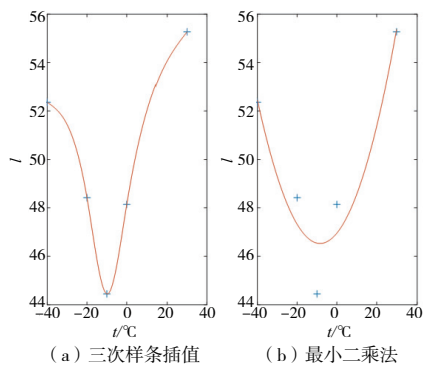


图7 两种方法对零点拟合效果图

从图6可以看出对于 k 与 t 之间的关系,两种方法拟合结果相差不大,相较于最小二乘法拟合,三次样条插值计算较为复杂,会占用 MUC 的较多资源,因此,对传感器 k 与 t 之间用最小二乘法拟合的方法较为合适。

而对于传感器 l 与 t 之间的关系(图7),采用三次样条插值的方法更符合传感器传递特性,因此,采用三次样条插值更为合适。

通过计算可以得出灵敏度系数 k 与温度 t 之间拟合曲线方程为

$$k(t) = -9.595 \times 10^{-7} \times t^2 + 6.067 \times 10^{-5} \times t + 0.126 6 \quad (22)$$

各温度区间的传感器0位输出 l 与温度 t 的三次样条插值多项式系数如表3所示。

表3 计算结果对温度三次样条插值后各区间系数

温度/℃	三次项 $\times 10^{-4}$	二次项 $\times 10^{-2}$	一次项 $\times 10^{-2}$	常数项
-40~-20	-3.5	0	-5.7	52.36
-20~-10	29.0	-2.1	-48.0	48.42
-10~0	-26.0	6.6	-2.7	44.45
0~30	1.5	-1.3	50.0	48.14

令 k_{RT} 与 l_{RT} 等于 30℃ 时的灵敏度系数以及 0 位输出,并代入式(6),可得出温度补偿后的传感器输出电压为

$$U'_t = 55.27 + 0.127 5 \times \frac{U_t - b(t)}{k(t)} \quad (23)$$

到此,便得到了传感器系统的输出-温度特性关系。将算法以 C 语言的形式写入到信号采集系统的主控芯片中。在正式工作时,信号采集系统采集环境温度,将其代入算法中便可得到温度补偿后的电压值,并通过电压-张力的关系将电压值转化为张力值,该过程均在主控芯片中自动完成。

经过上述算法,温度补偿后各温度点下的结果如图8所示。经计算,对传感器采用最小二乘法拟合和三次样条插值相结合的温度补偿后,传感器受温度影响所产生的误差从 3.9% 降低到了 0.28%,证明了该方法对传感器温度补偿的有效性。

为验证该温度补偿算法在 -40℃ ~ 30℃ 温度范围内的其他温度点的有效性,选择 15℃ 对该系统再次进行试验,本次试验通过信号采集系统的串口将温度补偿前后的电压值传输到上位机来完成。得到的数据如表4所示,表中的常温输出为传感器系统在温度为 30℃ 时的输出。

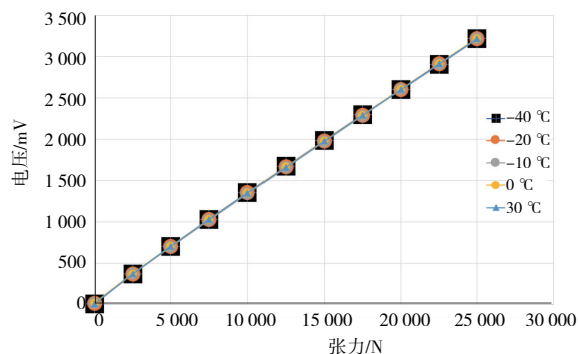


图8 温度补偿后的结果

表4 温度15 °C时温度补偿前后的传感器系统输出值

张力/N	常温 输出/mV	补偿前 输出/mV	补偿后 输出/mV
0	11	10	12
2 500	368	365	369
5 000	706	703	706
7 500	1 033	1 026	1 030
10 000	1 352	1 345	1 354
12 500	1 663	1 653	1 662
15 000	1 977	1 962	1 975
17 500	2 292	2 282	2 290
20 000	2 603	2 599	2 602
22 500	2 915	2 903	2 914
25 000	3 219	3 210	3 221

对以上的数据进行误差计算后可知温度补偿前系统输出与常温下系统输出之间的最大误差为0.47%,温度补偿后的系统输出与常温下系统输出之间的最大误差为0.09%。由此可证明本文提出的温度补偿算法的有效性。

5 结语

本文提出了一种针对非侵入式翼伞组提带张力传感器的温度补偿算法,该算法以最小二乘法拟合和三次样条插值的方法分别对传感器的灵敏度系数和0位输出进行温度补偿,并通过试验证

明了使用该算法对传感器进行温度补偿后,温度引起的传感器系统附加误差大大降低,从而提高了传感器的精度,为解决工业中温度对传感器精度造成影响的问题提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] 冯云明. 翼伞设计及其气动性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [2] 董梁,李岩军,程杨,等. 风场下翼伞系统运动特性研究[J]. 航天返回与遥感,2024,45(5):13-22.
- [3] LEEMAN A,PREDA V,HUERTAS I,et al. Autonomous parafoil precision landing using convex real-time optimized guidance and control[J]. CEAS Space Journal,2023,15(2):371-384.
- [4] 王乙,杨春信. 基于LBM的翼伞伞型曲面化气动特性研究[J]. 科技创新与应用,2024,14(6):1-6.
- [5] 邵天城,郭瑞鹏,李前奇,等. 翼伞组提带张力传感器的有限元分析[J]. 机械制造与自动化,2022,51(1):117-119.
- [6] 段非,张红英,李正达,等. 超大型组合翼伞与超大型连续翼伞的气动性能对比分析[J]. 航天返回与遥感,2024,45(1):65-77.
- [7] 刘贺. 基于人工神经网络的硅压阻式压力传感器温度补偿方法研究[D]. 淮北:淮北师范大学,2020.
- [8] 张艳锋,严家明. 基于最小二乘法的压力传感器温度补偿算法[J]. 计算机测量与控制,2007,15(12):1870-1871,1874.
- [9] 郭志君. 应变片式力传感器智能化测量系统的研究[D]. 上海:东华大学,2020.
- [10] 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.
- [11] 王文博,马琳,王永鹏,等. 基于三次样条曲线插值的压力传感器温度补偿研究[J]. 机电信息,2020(23):33-35.
- [12] 寿媛,陈豫眉. 利用MQ拟插值解决高次插值所出现的龙格现象[J]. 洛阳师范学院学报,2016,35(5):6-9.
- [13] 李淮江,王冰冰. 基于三次样条曲线插值的传感器温度补偿[J]. 三明学院学报,2015,32(4):38-42.

收稿日期:2023-10-09