

一种基于双轴转台温箱的加速度计温度 标定补偿方法

王月^{1,2}, 邱金娟^{1,2}, 杨小龙^{1,2}, 潘昊^{1,2}, 邝银周^{1,2}

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190; 2. 空间惯性测量技术实验室, 北京 100190)

摘要: 惯性器件是惯性系统的基础, 主要包括加速度计和陀螺仪。惯性导航系统实际工作时, 惯性器件会随环境温度变化而出现零偏和标度因子等指标变化, 最终影响惯性导航系统的初始对准和导航精度。其中, 陀螺仪一般采取温控措施保证其适应全温温度范围, 而加速度计出于小型化低功耗考虑, 一般采取温度补偿技术。为了消除环境温度对加速度计精度的影响, 需要对加速度计的零偏和标度因子进行 $-25\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全温工作范围的温度标定, 利用双轴转台温箱进行自动温度标定补偿, 得出与温度有关的数学规律, 建立补偿数学模型。利用该模型进行温度补偿后, 加速度计输出精度可提高一个数量级, 补偿效果明显。

关键词: 双轴转台温箱; 加速度计; 温度标定与补偿

中图分类号: V44

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025060

引用格式: 王月, 邱金娟, 杨小龙, 等. 一种基于双轴转台温箱的加速度计温度标定补偿方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 524-530.

WANG Yue, QIU Jinjuan, YANG Xiaolong, et al. A temperature calibration and compensation method for an accelerometer based on dual-axis turntable temperature chamber[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 524-530.

A Temperature Calibration and Compensation Method for An Accelerometer Based on Dual-Axis Turntable Temperature Chamber

WANG Yue^{1,2}, QIU Jinjuan^{1,2}, YANG Xiaolong^{1,2}, PAN Hao^{1,2}, ZHI Yin Zhou^{1,2}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;

2. Laboratory of Space Inertial Measurement Technology, Beijing 100190, China)

Abstract: Inertial devices are the foundation of inertial systems, mainly including accelerometers and gyroscopes. During the actual operation of an inertial navigation system, the inertial components will experience changes in indicators such as zero bias and scale factor with changes in ambient temperature, which ultimately affect the initial alignment and navigation accuracy of the inertial navigation system. Among them, gyroscopes generally adopt temperature control measures to ensure adaptability to the full temperature range, while accelerometers generally adopt temperature compensation technology for miniaturization and low power consumption considerations. To eliminate the influence of environmental temperature on the accuracy of the accelerometer, it is necessary to calibrate the zero bias and scale factor of the accelerometer within the full temperature working range of $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Automatic temperature calibration and compensation using a dual-axis turntable temperature box, find the mathematical laws related to temperature, establish a compensation mathematical model, and use this model for temperature compensation. After temperature compensation, the output accuracy of the accelerometer can be improved by an

收稿日期: 2024-10-20

作者简介: 王月(1985-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事惯性导航系统设计与测试研究。E-mail: yueyue_329@163.com。

order of magnitude, and the compensation effect is significant.

Key words: dual-axis turntable temperature chamber; accelerometer; temperature calibration and compensation

0 引言

加速度计是惯性导航和制导系统中的核心器件之一,用来测量作用在其敏感轴上的输入加速度,而加速度计的输出与所敏感到的实际加速度存在一定函数关系。挠性加速度计自 20 世纪 60 年代以来得到迅速发展,石英挠性加速度计以其机械性能稳定、内耗小、迟滞及漂移低成为一种十分有发展前景的挠性加速度计^[1-2]。

影响加速度计精度主要有两方面因素:一是来自加速度计自身,比如结构设计、加工工艺等;另一个是来自加速度计工作或标定时所处的外部环境条件,比如温度变化、大气压力、电磁干扰等都将影响加速度计的精度,进而影响惯导系统的精度^[3]。影响加速度计精度的外部条件有很多,温度变化是限制其精度提高的主要因素之一^[4]。当温度发生改变时,加速度计的误差模型也将发生改变。本文将探讨温度变化对加速度计标定精度的影响。

当环境温度在 -40~60 °C 变化时,加速度计漂移误差可达 2×10^{-4} g/°C,标度因数 K 的误差可达 3×10^{-4} /°C,甚至更大^[5]。因此,要想满足全温范围内对加速度计的性能需求,需要采取全温范围内的温度补偿方案。温度补偿方法需要通过一定的测试方法建立加速度计输出随温度变化的模型,然后根据所测定的加速度计温度对加速度计输出进行修正,从而提高加速度计的测量精度^[6]。

本文鉴于工程实践,提出了一种基于带温箱双轴转台的加速度计产品温度标定补偿方法,通过试验数据对零偏和标度因子进行建模并计算拟合参数,根据拟合数据对加速度计由温度变化引起的误差进行了有效补偿,补偿后精度可提高一个数量级。加速度计温度标定补偿方法主要包括多项式拟合、模型辨识、BP 神经网络和小波神经网络等,多项式拟合相比其他辨识方法更贴合于工程实际,应用简单;模型辨识、BP 神经网络需要建立数据库,更适合于理论研究。

1 石英挠性加速度计及建模原理

1.1 石英挠性加速度计原理介绍

石英挠性加速度计测量通道由表头和 IF(电

流信号转数字信号)转换电路组成。加速度计表头主要由摆组件、力矩器、混合集成电路等功能单元构成。其中,摆组件中的悬挂结构为敏感单元、力矩器为驱动单元,混合集成电路为信号处理单元,当加速度计受到外界激励时,作用在摆组件上的惯性力矩会使其偏离平衡位置,该位移量由摆组件与力矩器之间的差动电容检测器检测,并经混合集成电路转换、放大后成为输出与此位移量成正比的电流信号,最终进入力矩器线圈形成反馈力矩,用以平衡作用于摆组件的惯性力矩。通过测量力矩平衡时流经力矩器线圈的电流值,可测得沿加速度计输入轴上的线运动加速度。

石英挠性加速度计各组成单元在结构上相互连接,功能上相互关联。其中,摆组件与力矩器通过预负载结构进行固连,通过装配过程中预先施加一定的载荷以确保摆组件稳定工作。同时,组成力矩器的磁钢、极靴,连同摆组件上的线圈等一起组成加速度计内部磁路,用以为加速度计提供平衡惯性力矩的反馈力矩。

IF 转换电路主要是完成对加速度计表头的模数转换功能,采用了基于电荷平衡原理的 IF 转换电路,主要由恒流源电路、恒流源温补电路、积分电路、门坎电路、控制电路、桥开关电路、时钟电路及脉冲接口电路等组成。其结构原理如图 1 所示,电路原理框图如图 2 所示。

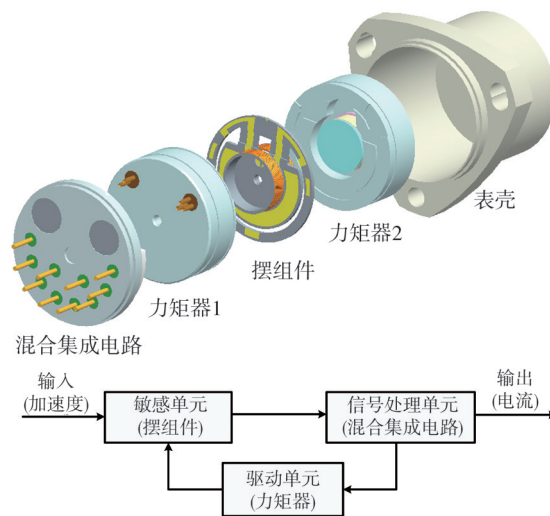


图 1 石英加速度计原理图

Fig. 1 Schematic diagram of quartz accelerometer

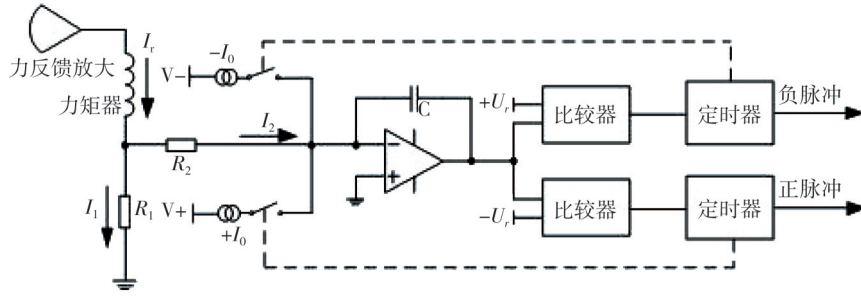


图2 电路原理框图

Fig. 2 Circuit schematic diagram

式中:

$$S_{ij} = \sum_k (T_{xk}^i - \bar{T}_x) (T_{xk}^j - \bar{T}_x),$$

$$S_{iK_a} = \sum_k (T_{xk}^i - \bar{T}_x) (K_{ak} - \bar{K}_a),$$

$$S_{K_a K_a} = \sum_k (k_{ak} - \bar{K}_a)^2.$$

由式(5)还可得到

$$a_0 = \bar{K}_a - a_1 \bar{T}_x - \dots - a_m \bar{T}_x^m. \quad (8)$$

设回归平方和为

$$U = \sum_{i=1}^m a_i S_{iK_a}, \quad (9)$$

则由式(7)有残余误差平方和 Q 的关系式为

$$S_{K_a K_a} = Q + U. \quad (10)$$

引入方差比和复相关系数 R ,有

$$F = \frac{U/m}{Q/(n-m-1)}, \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{U}{S_{K_a K_a}} = 1 - \frac{Q}{S_{K_a K_a}}, \quad (12)$$

可得

$$F = \frac{R^2/m}{(1-R^2)/(n-m-1)}, \quad (13)$$

$$R = \sqrt{\frac{mF}{(n-m-1) + mF}}. \quad (14)$$

上述公式计算结果可用来检验所有回归变量的总体效果。如果在拟合多项式中去掉第 m 次项,则这时对应的残差误差平方和将增大为 Q' ,

$$Q' = S_{K_a K_a} - U' = S_{K_a K_a} - \sum_{i=1}^{m-1} a_i S_{iK_a}. \quad (15)$$

所以,第 m 次项对回归平方和的贡献即变量 T_x^m 的偏回归平方和

$$U - U' = Q - Q'. \quad (16)$$

上式差值越大,说明第 m 次项越重要,相反贡献较小则可不引入^[8]。

只要测试出足够多温度点下加速度计的标度因数和零偏值,便可通过拟合得到加速度计各参数的温度系数,进而可以获得加速度计在任意温

1.2 建模原理

环境温度对加速度计零偏和标度因数的影响是加速度计温度误差中的主导因素^[7]。其中,加速度计表头温度遥测主要影响加速度计零偏,加加速度计板温度遥测主要影响标度因数,因此,标度因数 K_a 和零偏 F_0 可分别表示为加速度计板线路温度 T_x 、加速度计表头温度 T_b 的函数,见式(1)、(2)所示。

$$K_a = f(T_x), \quad (1)$$

$$F_0 = f(T_b). \quad (2)$$

用多项式拟合方法可表示为

$$f(T_x) = a_0 + a_1 T_x + a_2 T_x^2 + \dots + a_m T_x^m, \quad (3)$$

$$f(T_b) = b_0 + b_1 T_b + b_2 T_b^2 + \dots + b_m T_b^m, \quad (4)$$

式中: $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m, b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ 为标定补偿系数。

待求参数的个数为 $(m+1)$ 个。下面主要讨论如何用统计检验的方法来确定多项式拟合的阶数。以标度因数 K_a 为例,设定测量值为 $(T_{xk}, K_{ak}), k=1, 2, \dots, n$,则残余误差为

$$K_{ak} = a_0 + a_1 T_{xk} + a_2 T_{xk}^2 + \dots + a_m T_{xk}^m + v_{k0}. \quad (5)$$

组成方程组为

$$na_0 + \sum T_x a_1 + \dots + \sum T_x^m a_m = \sum K_a,$$

$$\sum T_x a_0 + \sum T_x^2 a_1 + \dots + \sum T_x^{m+1} a_m = \sum T_x K_a,$$

⋮

$$\sum T_x^m a_0 + \sum T_x^{m+1} a_1 + \dots + \sum T_x^{2m} a_m = \sum T_x^m K_a,$$

$$\sum K_a a_0 + \sum T_x K_a a_1 + \dots + \sum T_x^m K_a a_m = \sum T_x K_a a_0$$

对应 $\sum v_k = 0$,所以,等效残余误差方程为

$$K_{ak} - \bar{K}_a = a_1 (T_{xk} - \bar{T}_x) + \dots + a_m (T_{xk}^m - \bar{T}_x^m) + v_{k0}. \quad (6)$$

组成方程组为

$$\begin{cases} S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + \dots + S_{1m}a_m = S_{1y}, \\ S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + \dots + S_{2m}a_m = S_{2y}, \\ \vdots \\ S_{m1}a_1 + S_{m2}a_2 + \dots + S_{mm}a_m = S_{my}, \\ S_{y1}a_1 + S_{y2}a_2 + \dots + S_{ym}a_m = S_{yy}, \end{cases} \quad (7)$$

度点下的系数值,从而实现温度补偿。

2 加速度计温度影响及试验设计

外部环境温度变化,尤其是剧烈的温度变化,影响着石英挠性加速度计的测量精度。温度影响主要表现为3个方面:其一,高低温度变化会导致材料的温度系数发生变化;其二,环境温差巨大时,由于热胀冷缩会导致器件发生形变,造成石英挠性加速度计力矩线圈在磁场的有效长度发生变化,从而对输出产生影响;其三,加速度计的內部磁钢也具有一定的温度系数,当温度变化时,磁钢温度系数在变化,从而影响加速度计内部磁场强度的变化,对

加速度的输出产生影响。因此,从零偏和标度因数温度建模的方法着手,设计一种适合于工程应用的加速度计温度建模和补偿方法。

要建立加速度计零偏和标度因数与环境温度之间的函数关系,需要得到不同环境温度下对应的零偏和标度因数。本试验在带温箱的双轴转台中进行,使加速度计可以在多个指定的温度点工作,然后,在某温度点下标定出加速度计的零偏和标度因数,从而求取出其与环境温度间的函数关系。试验系统如图 3 所示。双轴转台可实现外框、中框两个自由度转动,满足三正交加速度计的测试需求;温箱的工作温度范围为-50~120℃,满足惯性测量单元组件温度标定试验温度范围。

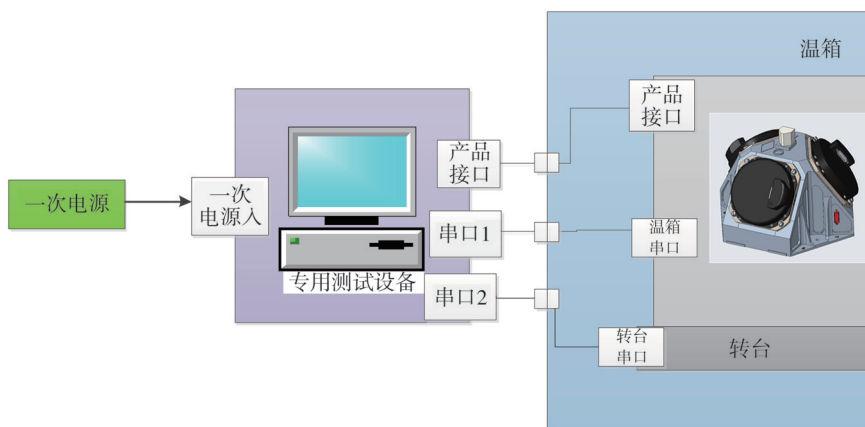


图 3 试验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

将惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)组件装到六面体测试工装上,安装到带温箱的双轴转台内,实现一次装卡三轴一次性自动化标定,分别通过温箱和转台串口控制温箱和转台,设定温箱试验温度在-25~45℃范围内每隔5℃一个温度点,每个温度点稳定时间不少于70 min,指定温度点到温稳定1 h后,采用12位置法对加速度计进行零偏和标度因数标定测试。具体试验如图 4 所示。

由于温度是个缓变过程,对加速度计实际输出的采样频率要求不高,取0.1 Hz频率进行采样。从试验数据分析可知,温度与加速度计输出确实存在相关性,因此,在多个温度点下分别进行标定试验,标定结束后,利用各测试位置加速度计输出值计算出各温度点下的零偏和标度因数,利用函数拟合方法即可辨识出对应的温度模型^[9-10]。

3 加速度计温度标定模型辨识

加速度计工程使用的计算模型为

$$\Delta v = (N_{Ai} * |g_0|) / K_{Ai} - A_{Ai} * |g_0| * T_s, \quad (17)$$

式中: Δv 单位为 m/s; $g_0 = 9.8015 \text{ m/s}^2$; $|g_0| = 9.8015$, 表示无量纲的 g_0 值; T_s 为控制周期; N_{Ai} 为 T_s 时间内, A_i 加速度计采集到的脉冲数; K_{Ai} 为 A_i 加速度计标度因数, 单位为 $\text{脉冲}/(\text{秒} \cdot g_0)$, 需要根据温度进行拟合计算; A_{Ai} 为加速度计提供的零偏补偿值, 单位为 g_0 , 需要根据温度进行拟合计算; A_i 表示第 i 号加速度计, $i = 1 \sim 3$ 。按照上述方

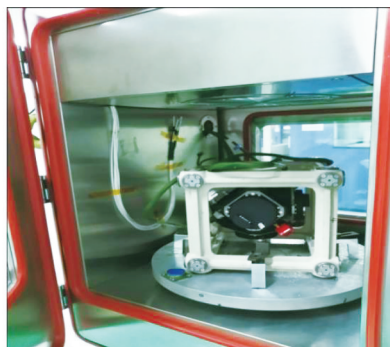


图 4 标定试验图

Fig. 4 Calibration test diagram

法分别对3只加速度计进行标定测试^[11-12]。

IMU组件中3个加速度计的零偏数据处理方法相同,以A1为例,以下详细介绍加速度计零偏和标度因数输出的数据处理方法。

采用12位置法获取A1通道加速度计脉冲输出,计算A1输入轴水平工况下脉冲输出矢量和求均值得到零偏,依次得到各温度工况下零偏输出值,然后将以上零偏输出与温度遥测进行多项式拟合,经试验数据验证多项式阶次为三阶时为最佳状态,拟合残差为0.999 5,多项式拟合系数即为需要提供标定误差系数。通过对零偏进行不同温度下多项式拟合,计算温度补偿后的零偏。零偏拟合见式(18)所示。

$A_{Ai} = K_{Ai3} * \dot{U}_{Ai}^3 + K_{Ai2} * \dot{U}_{Ai}^2 + K_{Ai1} * \dot{U}_{Ai} + b_{Ai}$, (18)
 式中: K_{Ai3} 为三次项系数; K_{Ai2} 为二次项系数; K_{Ai1} 为一次项系数; b_{Ai} 为常数项系数。表1给出了某产品3个通道加速度计零偏拟合系数。

表1 加速度计零偏拟合系数

Tab. 1 Zero bias fitting coefficient of accelerometer

通道	K_{A3}	K_{A2}	K_{A1}	b_{A0}
A1	-53.712	420.81	-1 074.70	793.55
A2	-14.823	101.35	-201.30	118.72
A3	-5.968	40.43	-76.16	84.70

采用12位置法获取A1通道加速度计脉冲输出,拟合计算得到A1标度因数,依次得到各温度工况下标度因数输出值,将各温度工况下标度因数与温度遥测进行多项式拟合,经验证多项式阶次依然采取三阶为最佳状态,拟合残差为0.999 9。通过对标度因数进行不同温度下多项式拟合,计算温度补偿后的标度因数模型。正标度因数拟合见式(19)所示。

$$K_{Ai} = K_{Ki+3} * \bar{U}_{Ai}^3 + K_{Ki+2} * \bar{U}_{Ai}^2 + K_{Ki+1} * \bar{U}_{Ai} + b_{Ki+}, \quad (19)$$

式中: K_{Ki+3} 为三次项系数; K_{Ki+2} 为二次项系数; K_{Ki+1} 为一次项系数; b_{Ki+} 为常数项系数。表2给出了某产品3个通道加速度计正标度因数拟合系数。

表2 加速度计正标度因数拟合系数

Tab. 2 Positive scaling factor fitting coefficient of accelerometer

通道	K_{+3}	K_{+2}	K_{+1}	b_{k+}
A1	-89.142	646.83	-1 419.00	91 733
A2	6.220	-46.73	262.28	91 042
A3	-124.110	909.70	-2 148.90	95 074

同理,得到负标度因数拟合为

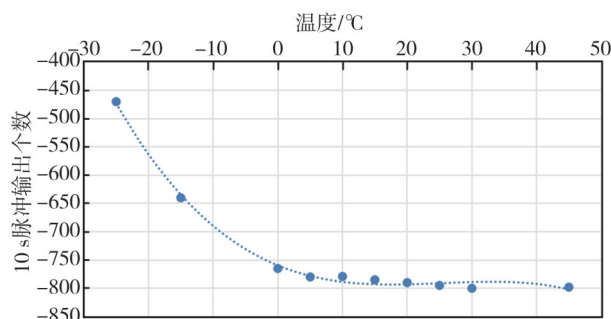
$$K_{Ai} = K_{Ki-3} * \dot{U}_{Ai}^3 + K_{Ki-2} * \dot{U}_{Ai}^2 + K_{Ki-1} * \dot{U}_{Ai} + b_{Ki-}, \quad (20)$$

式中: K_{Ki-3} 为三次项系数; K_{Ki-2} 为二次项系数; K_{Ki-1} 为一次项系数; b_{Ki-} 为常数项系数。表3给出了某产品3个通道加速度计负标度因数拟合系数。图5为某产品3个通道加速度计零偏标度因数的全温变化曲线。

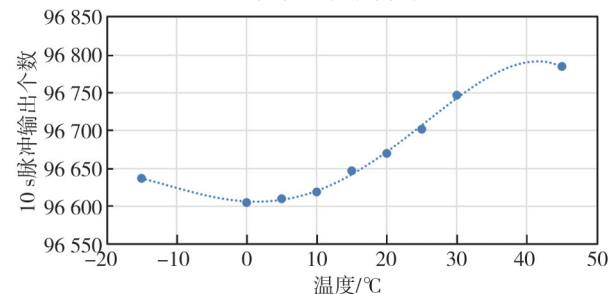
表3 加速度计负标度因数拟合系数

Tab. 3 Negative scaling factor fitting coefficient of accelerometer

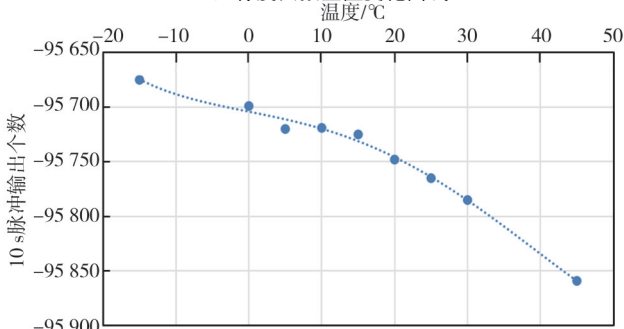
通道	K_{-3}	K_{-2}	K_{-1}	b_{k-}
A1	10.983	6.623 3	-341.60	-90 072
A2	-19.534	182.900 0	-651.79	-90 546
A3	-66.417	522.460 0	-1 435.40	-91 971



(a) 零偏全温变化曲线



(b) 正标度因数全温变化曲线



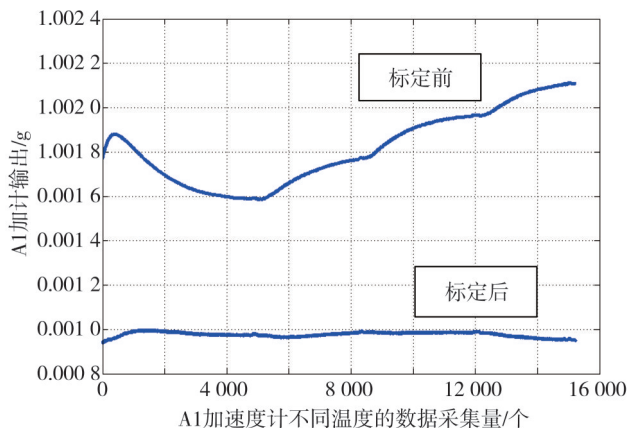
(c) 负标度因数全温变化曲线

图5 零偏、标度因数全温变化曲线

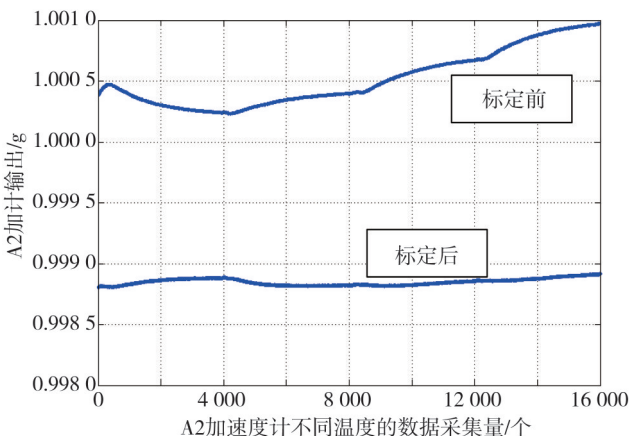
Fig. 5 Relationship between zero bias, scale factor, and temperature telemetry

为检验上述温度模型的正确性,选取2只加速度计进行温度补偿后的验证试验,在-25~

45 °C 的温度范围内, 选取不同温度点, 并在各温度点维持一段恒温时间。利用上述辨识模型对加速度计输出进行温度补偿, 对补偿前后的加速度计输出曲线进行对比。结果如图 6 所示。



(a) A1 通道加速度计标定前后对比曲线



(b) A2 通道加速度计标定前后对比曲线

图 6 两通道加速度计补偿前后数据曲线

Fig. 6 Two channel data curve before and after compensation

从输出曲线可以直观看出补偿后的加速度计输出稳定性得到提高, 加速度计输出均有一个数量级的提高, 具体数据如表 4 所示, 并进行至少 3 次重复性测试, 测试一致性较好。

表 4 两个通道加计补偿前后稳定性

Tab. 4 Stability before and after adding compensation for two channels

	A1 加速度计	A2 加速度计
补偿前输出稳定性	3.2190E-04	2.3216E-04
补偿后输出稳定性 1	2.0967E-05	2.2707E-05
补偿后输出稳定性 2	1.9875E-05	2.1506E-05
补偿后输出稳定性 3	2.0025E-05	2.1124E-05

同时, 对比二阶和四阶拟合的补偿精度, 二阶拟合情况下拟合残差不足 0.9, 四阶拟合情况下拟合残差与三阶拟合残差基本相当, 故选择三阶多项式拟合即可。

4 结 论

加速度计的性能受环境温度变化的影响严重, 这是影响惯性导航系统精度的重要原因之一。本文从工程应用角度设计了一种基于带温箱双轴转台的加速度计温度模型自动标定补偿试验方法, 并对误差系数进行辨识, 利用多项式拟合建立了加速度计的温度误差补偿模型。根据该模型对加速度计输出进行补偿, 最后进行了试验验证。结果证明, 使用该模型对加速度计进行补偿后, 加速度计的精度提高了一个数量级。该方法具有实现快捷简单, 为研究加速度计在惯性导航系统的实际工作中随温度变化的规律, 提高导航精度奠定了基础。

参考文献:

[1] 张宇飞, 屈建龙, 宋超, 等. 石英挠性加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(3): 356-359.
ZHANG Yufei, QU Jianlong, SONG Chao, et al. Temperature modeling and compensation of quartz flexible accelerometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(3): 356-359. (in Chinese)

[2] 张鹏飞, 龙兴武. 机抖激光陀螺捷联系统中惯性器件的温度补偿的研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 522-526.
ZHANG Pengfei, LONG Xingwu. Research on temperature compensation model of inertial sensor in mechanically dithered RLG's SINS [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 522-526. (in Chinese)

[3] 蒋金玲, 张晶, 朱欣华, 等. 硅微谐振式加速度计温度补偿方法研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 1-15.
JIANG Jinling, ZHANG Jing, ZHU Xinhua, et al. Review of temperature compensation methods for silicon micro-resonant accelerometers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 1-15. (in Chinese)

[4] 陈福彬, 张科备. 石英挠性加速度计温度补偿算法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 98-102.
CHEN Fubin, ZHANG Kebei. Temperature compensation algorithm of quartz flexible accelerometer [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(1): 98-102. (in Chinese)

[5] 付红坡, 温云同, 苗风海, 等. 一种新的基于 SCM-ANFIS 的加速度计温度建模与补偿方法[J]. 传感技

- 术学报, 2019, 32(12): 1795-1801.
- FU Hongpo, WEN Yuntong, MIAO Fenghai, et al. The new method of accelerometer temperature modeling and compensation based SCM-ANFIS [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(12): 1795-1801. (in Chinese)
- [6] LEE K I, TAKAO H, SAWADA K, et al. A three-axis accelerometer for high temperatures with low temperature dependence using a constant temperature control of SOI piezoresistors [C]//The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, IEEE, 2003: 478-481.
- [7] 段祥玉, 蒋伟, 杨功流, 等. 基于 ADIS16488 MEMS IMU 标定测试方法研究[J]. 测试技术学报, 2018, 32(1): 13-19.
- DUAN Xiangyu, JIANG Wei, YANG Gongliu, et al. Research on calibration testing method of ADIS16488 MEMS IMU [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2018, 32(1): 13-19. (in Chinese)
- [8] 张鹏飞, 王宇, 龙兴武, 等. 加速度计温度补偿模型的研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 1012-1016.
- ZHANG Pengfei, WANG Yu, LONG Xingwu, et al. Research on temperature compensating model for accelerometer [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(5): 1012-1016. (in Chinese)
- [9] ZHANG J, CHEN Y L, ZHANG L, et al. Application of sine cosine algorithm-support vector regression on temperature compensation of MEMS shear stress sensor[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(3): 263-269.
- [10] 郑晓东. 基于 DSP 的加速度计温度模型辨识与补偿方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [11] 于湘涛, 张兰, 郭琳瑞, 等. 基于小波最小二乘支持向量机的加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 95-98.
- YU Xiangtao, ZHANG Lan, GUO Linrui, et al. Temperature modeling and compensation of accelerometer based on least squares wavelet support vector machine [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 95-98. (in Chinese)
- [12] 贾继超, 王萌, 刘鑫, 等. 一种石英挠性加速度计非线性误差系统级标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(1): 67-71.
- JIA Jichao, WANG Meng, LIU Xin, et al. A systematic calibration method for nonlinear error parameters of quartz flexible accelerometers [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(1): 67-71. (in Chinese)

声 明

本刊已许可中国知网、万方数据知识服务平台、超星网等多家单位以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述各家网络著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。
