

文章编号: 1671-7449(2024)05-0543-09

## 基于TEC的石英挠性加速度计组件一体化 温控结构热设计

朱旭<sup>1,2</sup>, 侯承志<sup>1,2</sup>, 程嘉奕<sup>1,2</sup>, 魏国<sup>1,2</sup>, 谢元平<sup>1,2</sup>, 邓斌<sup>3</sup>, 周厦<sup>3</sup>, 高春峰<sup>1,2\*</sup>

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073; 2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;  
3. 湖南华惯科技有限公司, 湖南长沙 410100)

**摘要:** 在高精度惯性导航系统和捷联惯导重力测量系统中, 石英挠性加速度计组件的温控精度直接影响系统的导航和重力测量精度。为保证加速度计工作环境的温度稳定性, 设计了基于半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)的石英挠性加速度计一体化温度控制系统。对系统硬件结构和热特性进行了分析, 完成了相关组件的热力学建模、仿真分析和结构优化, 并设计了常温及变温环境下的温控实验。相关结果表明, 一体化温控系统在2 h室温环境下, 加速度计组件温度波动峰-峰值优于0.006 °C; 在最高10 °C/h的快速变温环境下, 系统3 h温度控制波动峰-峰值优于0.006 °C, 加速度计表头温度波动峰-峰值优于0.03 °C。对比温控关闭状态下的实验结果, 温控开启时, 加表输出稳定性及输出精度分别得到了34.2倍和37.6倍的提升。相关结果表明系统有较好的鲁棒性和温控精度, 可以满足多种应用环境下的加速度计组件温控应用需求。

**关键词:** 捷联惯导系统; 石英挠性加速度计; 温度控制; 半导体制冷器

中图分类号: TH824.4

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024061

**引用格式:** 朱旭, 侯承志, 程嘉奕, 等. 基于TEC的石英挠性加速度计组件一体化温控结构热设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 543-551.

ZHU Xu, HOU Chengzhi, CHENG Jiayi, et al. Thermal design of integrated temperature control structure for quartz flexible accelerometer components based on TEC[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 543-551.

## Thermal Design of Integrated Temperature Control Structure for Quartz Flexible Accelerometer Components Based on TEC

ZHU Xu<sup>1,2</sup>, HOU Chengzhi<sup>1,2</sup>, CHENG Jiayi<sup>1,2</sup>, WEI Guo<sup>1,2</sup>, XIE Yuanping<sup>1,2</sup>, DENG Bin<sup>3</sup>,  
ZHOU Xia<sup>3</sup>, GAO Chunfeng<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
3. Huaguan Technology Co., Ltd., Changsha 410100, China)

**Abstract:** In high-precision inertial navigation systems or strap-down inertial navigation gravity measurement systems, the temperature control accuracy of the quartz flexible accelerometer directly affects the navigation and gravity measurement accuracy of the system. To ensure the temperature stability of the

收稿日期: 2023-12-04

作者简介: 朱旭(2000—), 男, 硕士生, 主要从事光电惯性技术研究。E-mail: 17333151763@163.com。

\* 通信作者: 高春峰(1989—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光电惯性技术研究。E-mail: neil1989@126.com。

accelerometer assembly working environment, this paper designed a temperature control system based on a thermoelectric cooler, analyzed the hardware structure and thermal characteristics of the system, and designed temperature control experiments under normal and variable temperature environments. The experiment results showed that the peak-to-peak temperature fluctuation of the accelerometer assembly is better than  $0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$  under 2-hour room temperature conditions; Under a rapidly changing temperature environment of up to  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ , the system's 3-hour temperature control fluctuation peak to peak is better than  $0.006\text{ }^{\circ}\text{C}$ , The peak to peak temperature fluctuation of the accelerometer head is better than  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Compared to when the temperature control is turned off, when the temperature control is turned on, the stability and accuracy of the meter output have been improved by 34.2 times and 37.6 times. The system has good robustness and temperature control accuracy, and can meet the temperature control requirements of accelerometer components in various application environments.

**Key words:** strapdown inertial navigation system; quartz flexible accelerometers; temperature control; thermoelectric cooler

## 0 引言

加速度计是惯导系统的核心传感器件,它的测量结果会直接影响惯导系统的总体精度和性能<sup>[1]</sup>。外界温度变化及其自身发热往往会干扰加速度计组件工作环境的温度场分布,直接影响加速度计表芯结构和内部磁场参数的变化,从而导致其输出随温度漂移,严重影响加速度计的精度与稳定性,进而降低整个惯导系统的导航精度<sup>[2-4]</sup>。为减小温度波动对加速度计精度的影响,国内外研究人员开展了大量的研究工作<sup>[5-9]</sup>。除了从加速度计结构本身进行优化外,主要有温度补偿与温度控制两种方案。与温度补偿法相比,温度控制需要增加额外的硬件设施,且启动速度较慢,但其受环境温度的影响较小。此外,在高精度测量领域,温度补偿法对加速度计的精度提升效果有限<sup>[10-11]</sup>,难以满足高精度的测量要求。因此,高精度导航应用场合大多采用温度控制法<sup>[12]</sup>。

李纪莲<sup>[12]</sup>,Cao等<sup>[13]</sup>分别在SGA-WZ01、SGA-WZ02航空重力仪中设计了针对加速度计的多级温控系统,其中最内层温控采用加热片作为温控执行机构,实现了 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温控精度。赵虎等<sup>[14]</sup>设计了一种带抽头的加热片,将温控分为粗温控和精温控两个阶段,成功实现了温控精度优于 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、温升时间小于15 min的加速度计组件温控系统设计。

现有石英挠性加速度计温控系统大多以加热片为温控执行机构,采用纯加热的单向温控方式,难以适用于环境温度过高的情况。

针对上述问题,本文给出了一种基于半导体

制冷器的石英挠性加速度计一体化温控系统的整体设计方案,分析了加速度计与双层温控结构件的热力学特性,完成了相关组件的热力学建模、仿真分析和结构优化,实现了加速度计组件内部温度的快速稳定与高精度温度控制。

## 1 一体化温控结构热传导建模与结构优化设计

加速度计在工作过程中会产生部分热量,且系统工作的环境温度也会随着时间与空间的变化而变化,由于外界温度不可控,加速度计与外界的热量交换也不可控。因此,为了实现其工作环境的精确控制,就要通过隔热层来限制其热量交换,再通过半导体制冷片(如图1)将隔热层内产生的热量转移到隔热层外,使系统内的热量达到平衡状态,从而实现稳定温度的效果<sup>[15]</sup>。



图1 半导体制冷片

Fig.1 Semiconductor chilling plate

半导体制冷片,也叫热电制冷片,利用半导体材料的Peltier效应,当直流电通过两种不同半导体

材料串联成的电偶时,在电偶的两端分别吸收热量和放出热量,可以实现制冷或制热的目的。

基于此设计思路,加速度计组件整体采用铝合金材质,主要用于电磁屏蔽、散热与保护内部结构。加速度计组件为双层结构,为方便建模,将系统简化为二级温控模型。加速度计组件外壳视为第一级,加表及内层视为第二级。其简化的传热模型如图 2 所示。

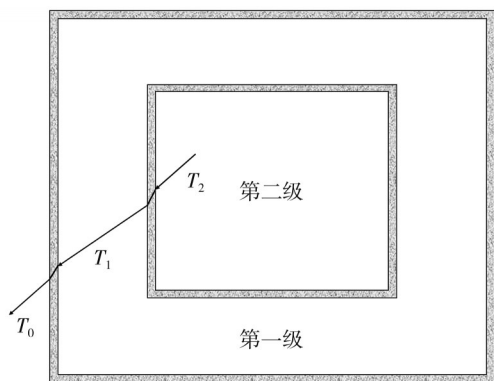


图 2 加速度计组件传热模型简化图

Fig. 2 Simplified diagram of heat transfer model for accelerometer components

以二级温度控制系统为研究对象,设其热容为  $C_2$ , 温度为  $T_2$ , 单位时间内第二级被控对象产生热量为  $Q_2$ , 同时对外流失的热量为  $Q'_2$ , 则

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = Q_2 - Q'_2 \quad (1)$$

设第二级系统纯时滞时间为  $\tau_2$ , 被控对象总发热功率为  $P_2(t)$ , 第二级到第一级之间的热阻为  $R_2$ , 则

$$Q_2 = P_2(t), \quad (2)$$

$$Q'_2 = \frac{T_2(t) - T_1(t - \tau_2)}{R_2} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)得

$$C_2 \frac{dT_2(t)}{dt} + \frac{T_2(t) - T_1(t - \tau_2)}{R_2} = P_2(t) \quad (4)$$

对式(4)作拉氏变换,

$$(R_2 C_2 s + 1) \cdot T_2(s) = R_2 P_2(s) + T_1(s) e^{-\tau_2 s} \quad (5)$$

设第一级热容为  $C_1$ , 温度为  $T_1$ , 单位时间内产生热量为  $Q_1$ , 流失热量为  $Q'_1$ , 从第二级对象中接收的热量为  $Q_{21} = Q'_2$ 。根据能量守恒定律有

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = Q_1 + Q_{21} - Q'_1 \quad (6)$$

设第一级被控对象总发热功率为  $P_1(t)$ , 纯时滞时间为  $\tau_1$ , 环境温度为  $T_0$ , 第一级到环境温度之间的热阻为  $R_1$ , 那么

$$Q_1 = P_1(t), \quad (7)$$

$$Q'_1 = \frac{T_1(t) - T_0(t - \tau_1)}{R_1} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(6)得

$$C_1 \frac{dT_1(t)}{dt} = P_1(t) + \frac{T_2(t) - T_1(t - \tau_2)}{R_2} - \frac{T_1(t) - T_0(t - \tau_1)}{R_1} \quad (9)$$

式(9)与式(4)相加得

$$C_1 \frac{dT_1(t)}{dt} + C_2 \frac{dT_2(t)}{dt} = P_1(t) + P_2(t) - \frac{T_1(t) - T_0(t - \tau_1)}{R_1} \quad (10)$$

整理得

$$C_1 R_1 \frac{dT_1(t)}{dt} + T_1(t) = R_1 P_1(t) + R_1 P_2(t) + T_0(t - \tau_1) - C_2 R_1 \frac{dT_2(t)}{dt} \quad (11)$$

对式(11)进行拉式变换,

$$T_1(s) = \frac{R_1}{C_1 R_1 s + 1} P_1(s) + \frac{R_1}{C_1 R_1 s + 1} P_2(s) + \frac{e^{-\tau_1 s}}{C_1 R_1 s + 1} T_0(s) - \frac{C_2 R_1 s}{C_1 R_1 s + 1} T_2(s) \quad (12)$$

将式(12)代入式(5)可得

$$\left[ C_1 C_2 R_1 R_2 s^2 + (C_1 R_1 + R_2 C_2 + C_2 R_1 e^{-\tau_2 s}) s + 1 \right] \cdot T_2(s) = R_1 e^{-\tau_2 s} P_1(s) + (C_1 R_1 R_2 s + R_2 + R_1 e^{-\tau_2 s}) \cdot P_2(s) + e^{-\tau_1 s} e^{-\tau_2 s} T_0(s) \quad (13)$$

由式(13)可知,  $T_2$  由  $P_1$ 、 $P_2$  和  $T_0$  共同决定。其中  $P_1$  完全取决于帕尔贴冷端产热功率,  $P_2$  受帕尔贴热端功率与加表内部发热共同作用, 且加表发热功率较小, 帕尔贴在其中占据主导作用。

由于帕尔贴在一端吸热在另一端放热, 且与靠近加表的一侧相比,  $P_1$  要经历更为复杂的传热过程才能作用到加表。因此, 为实现第二级温度精准控制的同时使系统的效率尽可能高, 就要在减小  $P_1$  影响的同时增大  $P_2$  的影响, 为此需减小第一级到外界的热阻  $R_1$ , 增大第二级到第一级的热阻  $R_2$ 。热阻受导热和对流换热影响, 其具体表达式如下

$$R = \frac{l}{\lambda A} + \frac{1}{\alpha A}, \quad (14)$$

式中:  $l$  为导热材料厚度;  $\lambda$  为导热系数;  $A$  为接触面积;  $\alpha$  为对流换热系数。基于以上思路可以从增大第一级与外界导热系数、减小第二级到第一级导热系数、增大第一级与外界接触面积几方面对系统进行优化。

经上述分析, 本文采用如下方式对其进行

优化:

1) 主体分为盖板、外壳与底座三大部分。其中外壳四周采用双层结构,顶部设有凹槽。底座上方为3个正交的加速度计安装基座用于安装加速度计,基座为金属材质并且将加速度计底部完全包裹,可以使加速度计的温度分布更为均匀。底座下方开有矩形空腔,空腔外加装侧板用于密封。在外壳的顶部凹槽、四周夹缝及底座空腔内共装配6块帕尔贴,帕尔贴与两层金属壳之间用导热剂粘合,其余部分填充保温棉,隔热棉与帕尔贴连接处缝隙用隔热胶填充。其内部结构及实物图分别如图3、图4所示。

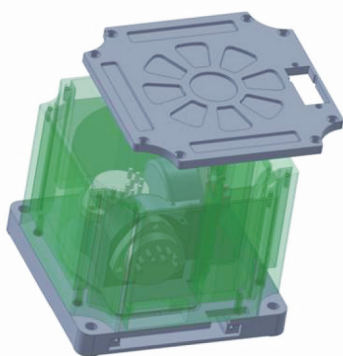


图3 加速度计组件结构图

Fig. 3 Structural diagram of accelerometer components



图4 加速度计组件实物图

Fig. 4 Physical diagram of accelerometer components

2) 将加速度计组件安装在金属板上,中间用导热剂粘结,以增大第一级对外界的散热能力。

3) 第一级与第二级之间除帕尔贴的部分用隔热棉填充,隔热棉与帕尔贴连接处缝隙用隔热胶填充。

## 2 一体化温控结构热力学仿真与分析

由于加速度计组件温控系统是为加速度计提供稳定的环境温度,且加速度计内部生热量较小,其

本身的温度梯度对加速度计组件温度分布影响较小。在加速度计组件的热力学仿真中,主要通过分析其热稳态下加速度计组件各部分的温度分布来验证其结构的合理性,为简化仿真参数计算,忽略加速度计内部结构,将其视为一个整体。

仿真主要涉及到各个面的热传导、热对流、热辐射以及加速度计的內部产热。在3种热量传递的方式中,决定热传导的导热系数与决定热辐射的辐射系数很大程度上是由材料自身的性质决定的<sup>[16]</sup>。在加速度计各部分组件的材质都已经确定的情况下,只需要计算加速度计的內部产热及各部分的热对流系数。

根据相关性能指标<sup>[17]</sup>,单个石英挠性加速度计的工作电流为1.2 mA,线圈的电阻约为80 Ω,加速度计总体积为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ,所以,其发热功率密度约为

$$E = (I^2 \cdot R) / V = 11.52 \text{ W/m}^3. \quad (15)$$

热对流受介质流速影响较强。在加速度计组件内部,由于空间较小且封闭,并且在六面均匀分布帕尔贴的状况下,内部温度分布较为均匀,空气流动性较差,因此,可将内部的热对流忽略,仅考虑加速度计组件外部的热对流。

对流换热系数 $h$ 与影响换热过程的诸多因素相关,它不仅取决于流体的物性以及换热表面的形状、大小与布置,而且还与流速有密切的关系。加速度计表面除盖板外皆为光滑平面,盖板处为增加散热设计有较浅的凹槽,其散热效果强于平面。考虑到加速度计组件的对流换热过程为自然对流,将加速度计组件竖直外侧4个面、底板侧面及盖板都视作平壁,将侧面连接处的凹槽视为圆柱,底板底部不与空气接触,不考虑其对流换热。自然对流条件下的换热系数表达式为

$$h = \frac{Nu\lambda}{L}, \quad (16)$$

式中: $Nu$ 为努塞尔数,不同几何形状的物体有着不同的努塞尔数; $\lambda$ 为导热率; $L$ 为物体的特征长度,其决定因素为物体的几何形状,对于平板, $L = A/P$ ,其中 $A$ 和 $P$ 分别为平板的面积和周长。在曲率半径没有小到会对流动和换热产生明显影响时,竖圆柱与竖平壁自然对流换热的公式相同<sup>[18]</sup>。

对于竖直的平板,

$$Nu_m = C(GrPr)_m^n, \quad (17)$$

$$Gr = \frac{ga_v \Delta T L^3}{\nu^2}, \quad (18)$$

$$Pr = \alpha \nu, \tag{19}$$

式中： $Nu_m$  为由平均表面传热系数组成的  $Nu$ ； $C$  与  $n$  由实验或查表获得； $Gr$  为格拉晓夫数，用以表示流体上的浮升力和粘性力的相对大小； $g$  为重力加速度； $\alpha_v$  为体胀系数； $\Delta T$  为壁面温度与环境温度之差； $\nu$  为流体动量扩散系数； $Pr$  为普朗特数； $\alpha$  为热扩散率。

当  $10^4 < Gr \cdot Pr < 10^7$  时，对于水平热平板的上表面有<sup>[19]</sup>

$$Nu = 0.54(GrPr)^{1/4}. \tag{20}$$

设定环境温度为室温 25 °C，表面温度 46 °C，利用式(16)~式(20)计算加速度计组件外壳各部分的对流换热系数，结果如表 1 所示。

表 1 加速度计组件表面的热系数

Tab. 1 The thermal coefficient of the surface of the accelerometer component

component	等效长度/mm	格拉晓夫数
顶盖上表面	25.00	$4.71 \times 10^4$
垂直侧面	16.87	$1.43 \times 10^4$
底板侧面	5.50	$4.96 \times 10^2$
侧面圆柱凹槽	9.14	$2.28 \times 10^3$
	换热系数/[W/(m <sup>2</sup> *K)]	努塞尔数
顶盖上表面	9.40	8.95
垂直侧面	11.29	7.26
底板侧面	14.96	3.14
侧面圆柱凹槽	13.15	4.58

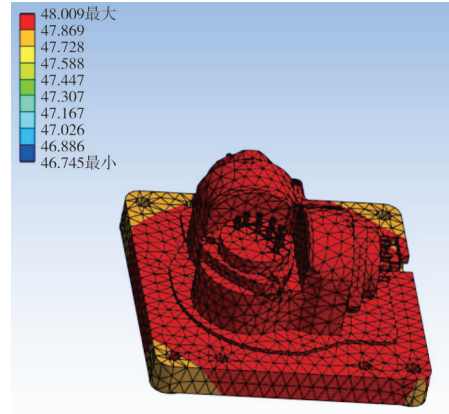
根据上述分析，设置外壳各部分的换热系数，并将加表内部发热功率密度设为 11.52 W/m<sup>3</sup>；外界空气温度设为 25 °C，加速度计组件内部温度设为 46 °C，各组件材料按真实材质一一设定。

最后选用四面体网格划分法，并对结构连接处的有限元网格划分进行细化，最终的有限元模型如图 5 所示，划分的有限元节点 107 525 个，有限元单元 60 253 个。

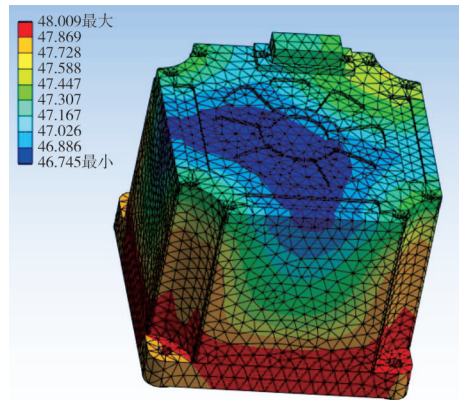
其内部及外壳的稳态热仿真结果分别如图 5 (a) 和图 5(b) 所示。

从图 5 中可以看出，由于加速度计组件内部密封，空气不流通，且六面均匀分布着 6 块相同的帕尔贴，加之底座与加表外壳都为金属材质且紧密连接，加表及其安装底座温度分布较为均匀。壳体外表面与外界空气直接接触，温度低于内部。

从仿真结果可以看出，内部加表及加表安装基座温度分布较为均匀，外壳温度明显低于内部温度。该仿真结果说明，加速度计组件内部隔热及外部散热效果良好，结构设计较为合理，能够保证其内部及加表的温度分布的均匀性。



(a) 内部温度分布



(b) 外部温度分布

图 5 加速度计组件的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of accelerometer components

### 3 常温/变温环境下温控系统精度实验验证

#### 3.1 室温环境下系统温控精度验证

为验证系统在常温条件下的温控精度，将本系统置于 28 °C 左右的室温环境中，如图 6 所示，温度传感器置于 3 个加表中间，目标温度设置为 46 °C，利用上位机软件以 10 Hz 采样频率采集系统内部温度数据 120 min，重复实验 3 次。其上升曲线如图 7 所示。

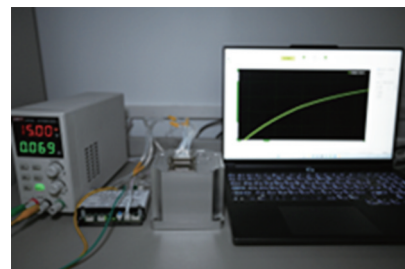


图 6 室温环境下的实验图

Fig. 6 Experimental diagram at room temperature

从图7可以看出,系统可以在开启后13 min左右从28℃升温并稳定至热平衡温度46℃。在升温过程,帕尔贴功率恒定的情况下升温曲线的斜率未发生较大变化,证明了加速度计组件良好的隔热能力。

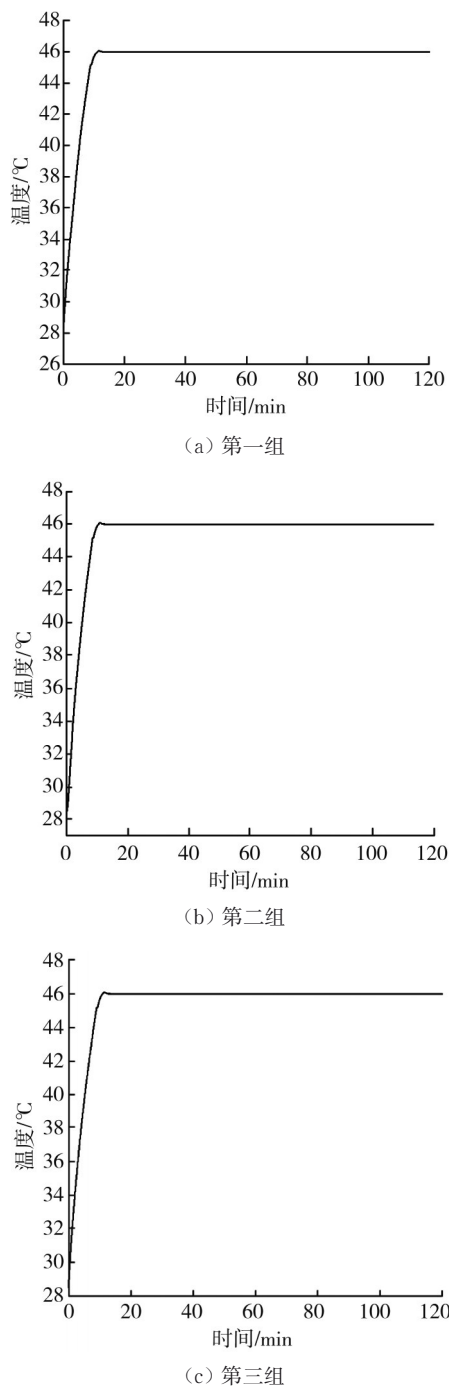


图7 室温环境下温度变化曲线

Fig. 7 Temperature variation curve at room temperature environment

从图8可以看出,3组实验在稳定后温度波动的峰-峰值约为0.006℃。

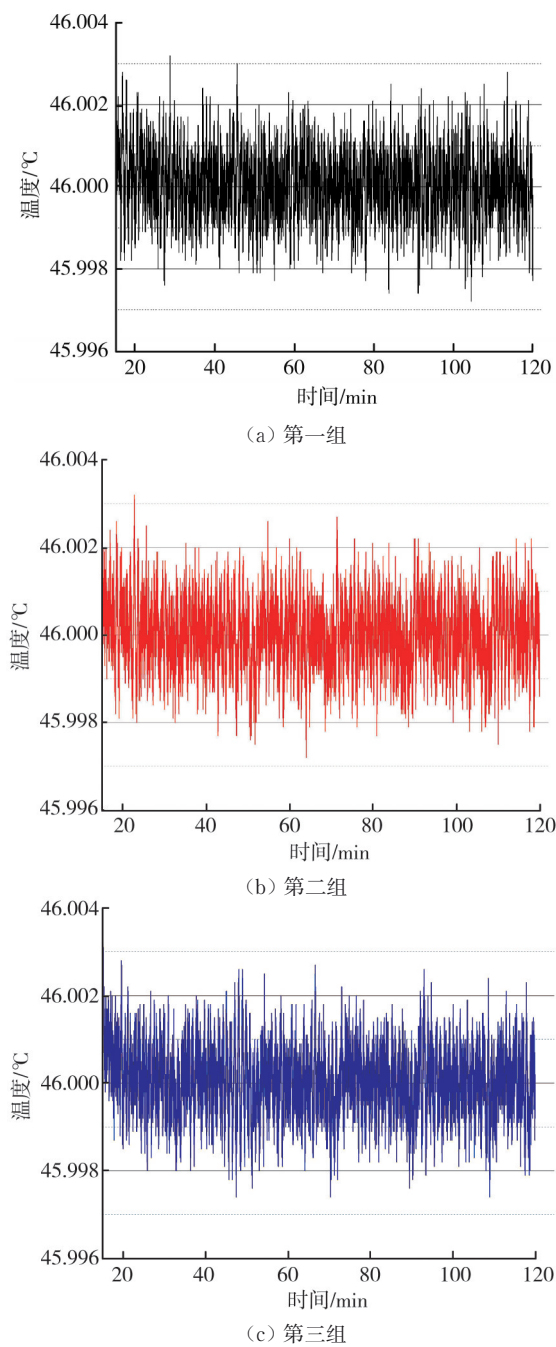


图8 稳态局部放大

Fig. 8 Steady-state local amplification

统计3组实验的各项数据,结果如表2所示。

表2 室温实验下各组数据统计

Tab. 2 Statistics of data for each group under room temperature experiment			
	稳定时间/min	最大值/℃	
第一组	13.5	46.003 3	
第二组	12.7	46.003 6	
第三组	13.4	46.003 5	
	最小值/℃	峰-峰值/℃	标准差/℃
第一组	45.997 2	0.006 1	$7.6 \times 10^{-4}$
第二组	45.997 2	0.006 4	$7.5 \times 10^{-4}$
第三组	45.997 4	0.006 1	$7.5 \times 10^{-4}$

从以上结果可以看出,该加速度计组件温控系统在室温环境下能够快速升温至设定值,且稳定性较好,可以在长时间的控制中将温度波动的范围限制在±0.003℃左右。

### 3.2 变温环境下系统有效性验证

为进一步验证温控系统在不同环境下的适用性,将装配有加速度计的温控系统静置在温箱内,分别在开启温控系统与关闭温控系统的情况下对其进行变温环境下的测试,测试时间为 3 h。变温环境下的实验图如图 9 所示。



图 9 变温环境下的实验图

Fig. 9 Experimental diagram under variable temperature environment

温控系统关闭时,温箱温度变化及 Z 轴加速度计表头温度变化分别如图 10、图 11 所示。

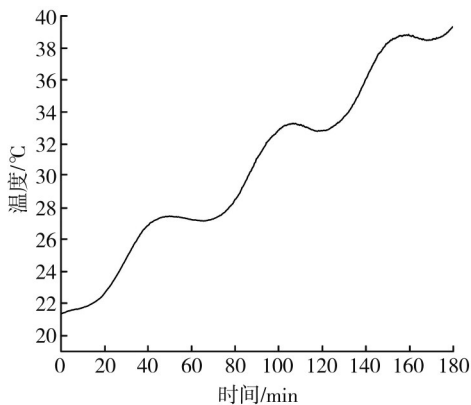


图 10 温控系统关闭测试中温箱温度变化

Fig. 10 Temperature change in the temperature box during the shutdown test of the temperature control system

保持温箱温度设定不变,打开温控系统,利用同一组设备对其进行 3 h 的变温测试。在温控系统开启的变温测试过程中,温箱温度变化、加速度计组件内部温度变化、Z 轴加速度计表头温度变化分别如图 12~图 14 所示。

由图 11 和图 13 可以看出:在 3 h 的变温测试过程中,温箱温度从 20℃上升到了 40℃;在温控系统关闭的情况下,加速度计表头温度升高了约 16℃;

当温控开启时,在温控系统的作用下,加速度计组件温度始终维持在(46±0.003)℃,Z 轴加速度计表头的温度也始终稳定在(46±0.015)℃。相比于温控系统关闭时的状态,加速度计表头温度的波动幅度减小了约 533 倍。

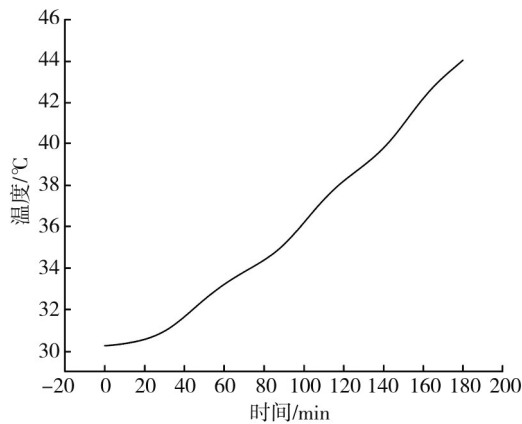


图 11 温控系统关闭测试中 Z 轴加表温度变化

Fig. 11 Temperature change of Z-axis accelerometer during temperature control system shutdown test

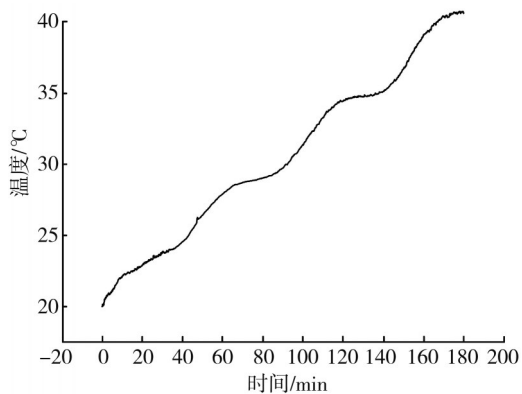


图 12 温控系统开启测试中温箱温度变化

Fig. 12 Temperature change in the temperature box during the opening test of the temperature control system

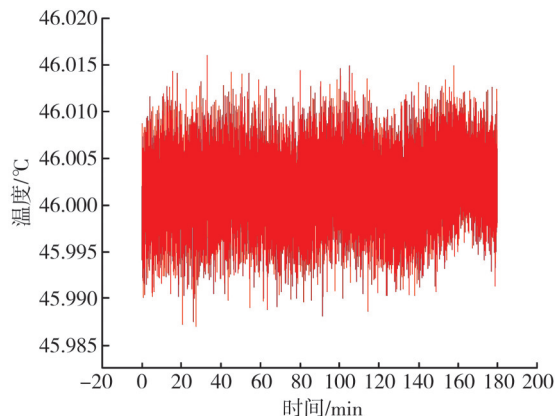


图 13 温控系统开启测试中加速度计表头温度变化

Fig. 13 Temperature change of accelerometer head during temperature control system startup test

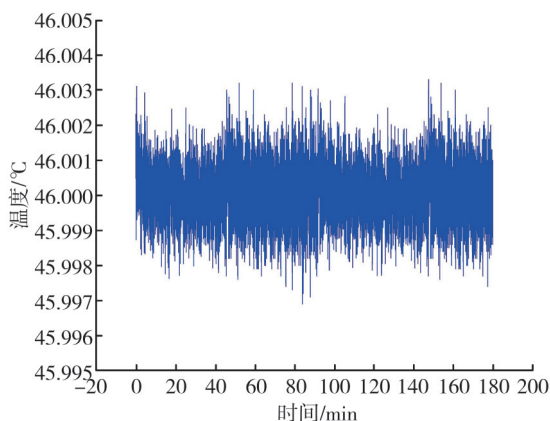


图 14 温控系统开启测试中组件温度变化

Fig. 14 Component temperature changes during temperature control system startup testing

两组实验中，Z轴加速度计输出情况如图 15、图 16 所示。

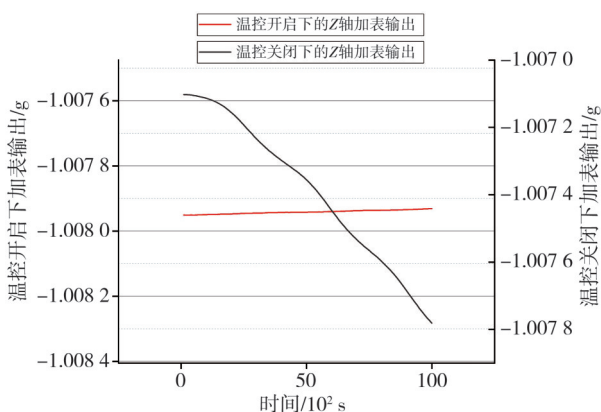


图 15 Z轴加表百秒输出均值

Fig. 15 Average output of Z-axis accelerometer in 100 seconds

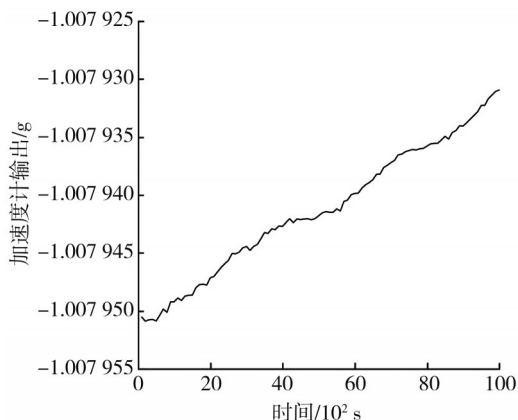


图 16 温控系统开启时Z轴加表百秒输出均值

Fig. 16 The average output of the Z-axis accelerometer in 100 s when the temperature control system is turned on

由图 15 所示，在温控系统开启后，加速度计输出的波动幅度得到明显抑制。为进一步量化温控系统对加速度计输出精度及稳定性的提升，对两组实验数据进行数学统计，其结果如表 3 所示。

表 3 3 h 变温实验下 Z 轴加表百秒输出统计

Tab. 3 Statistics of 100 second output of Z-axis accelerometer under variable temperature experiment

	均值变化量/ $\mu\text{g}$	均方差/ $\mu\text{g}$
关闭温控组	679.1	210.1
开启温控组	19.8	5.6

在 3 h 的变温测试中，温控系统关闭与开启条件下的加速度计输出波动峰-峰值分别为 679.1  $\mu\text{g}$  和 19.8  $\mu\text{g}$ ，输出稳定性提高了 34.2 倍。温控系统关闭与开启条件下加速度计输出值的百秒均方差分别为 210.1  $\mu\text{g}$  和 5.6  $\mu\text{g}$ ，输出精度提高了 37.6 倍。在温控系统的作用下，加速度计的输出稳定性及输出精度都得到了明显提升，证明了温控系统的有效性。

## 4 结 论

针对加速度计工作过程中环境温度变化会引入额外误差的问题，从硬件着手，设计了基于帕尔贴的石英挠性加速度计组件温控系统，并利用 ANSYS 软件对加速度计组件的热力学性能进行了仿真分析，最后通过实验验证了该系统的有效性。实验结果表明在室温环境下，系统能快速稳定地达到目标温度，且稳定后温度波动的峰-峰值优于  $\pm 0.003\text{ }^\circ\text{C}$ ；在外界环境温度 3 h 变化了  $20\text{ }^\circ\text{C}$  的情况下，系统仍可以将组件温度波动稳定在  $\pm 0.003\text{ }^\circ\text{C}$ ，加速度计表头温度稳定在  $\pm 0.015\text{ }^\circ\text{C}$ 。对比温控系统开启与关闭情况下的加速度计输出，其输出稳定性及输出精度分别得到了 34.2 倍及 37.6 倍的提升。相关结果表明系统有较好的鲁棒性和温控精度，能够有效抑制加速度计输出在温度变化情况下产生的漂移现象。

## 参考文献:

- [1] 王常虹, 任顺清. 惯性仪表标定误差的补偿抑制技术综述[J]. 导航与控制, 2020, 19(s1): 246-256.  
WANG Changhong, REN Shunqing. Analysis of development trend and situation of inertial instrument measurement technology[J]. Navigation and Control, 2020, 19(s1): 246-256. (in Chinese)
- [2] 张阳, 杜剑. 石英加速度计贮存延寿试验薄弱环节的辨识[J]. 空间电子技术, 2021, 18(1): 80-86.  
ZHANG Yang, DU Jian. Identification for weak links on storage life of quartz accelerometer[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(1): 80-86. (in Chinese)
- [3] WANG C, LI X, KOU K, et al. Optimization of magnetic hat for quartz flexible accelerometer[J]. Sensor Review, 2016, 36(1): 71-76.

- [4] LI B, LI C, ZHAO Y, et al. An integrated packaged resonant accelerometer with temperature compensation [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(10): 105004.
- [5] 崔黎, 聂鲁燕, 李立勇, 等. 石英挠性加速度计温度稳定性改进设计[J]. *中国惯性技术学报*, 2022, 30(5): 658-665.  
CUI Can, NIE Luyan, LI Liyong, et al. Improved design for temperature stability of quartz flexible accelerometer[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2022, 30(5): 658-665. (in Chinese)
- [6] 金言. 石英挠性加速度计精度提升关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [7] 杨峰, 王勇, 彭志高. 石英挠性加速度计磁路参数研究[J]. *压电与声光*, 2020, 42(1): 123-126.  
YANG Feng, WANG Yong, PENG Zhigao. Study on magnetic circuit parameters of quartz flexible accelerometer[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2020, 42(1): 123-126. (in Chinese)
- [8] 付红坡. 石英挠性加速度计参数稳定性分析与建模预测[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2020.
- [9] ZHANG Z G, ZHAO D X, HE H Y, et al. Study on driving noise of quartz flexible accelerometer torquer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(9): 095125.
- [10] WANG X, ZHANG C X, SONG L L, et al. Temperature compensation for quartz flexible accelerometer based on nonlinear auto-regressive improved model[J]. *Measurement & Control*, 2023, 56(1/2): 124-132.
- [11] ZHANG C X, WANG X, SONG L L, et al. Temperature hysteresis mechanism and compensation of quartz flexible accelerometer in aerial inertial navigation system[J]. *Sensors*, 2021, 21(1): E294.
- [12] 李纪莲. 航空重力测量系统精密温度控制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [13] CAO J L, WANG M H, CAI S K, et al. Optimized design of the SGA-WZ strapdown airborne gravimeter temperature control system [J]. *Sensors*, 2015, 15(12): 29984-29996.
- [14] 赵虎, 王淞立, 刘海斌, 等. 高精度单晶硅挠性摆式加速度计组件的工程化实现[J]. *中国惯性技术学报*, 2017, 25(3): 360-364.  
ZHAO Hu, WANG Songli, LIU Haibin, et al. Engineering realization of high-precision silicon flexure accelerometer triad [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(3): 360-364. (in Chinese)
- [15] 张春熹, 李森, 陈光建. 光纤陀螺惯性测量组合的数字温控系统设计[J]. *中国惯性技术学报*, 2008, 16(5): 543-547.  
ZHANG Chunxi, LI Sen, CHEN Guangjian. Digital temperature control system design for FOG inertial measurement unit [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, 16(5): 543-547. (in Chinese)
- [16] 张洪信, 管殿柱. 有限元基础理论与 ANSYS 11.0 应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [17] 李清梅. 石英挠性加速度计温度误差建模与补偿技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [18] 杨世铭. 细长竖圆柱外及竖圆管内的自然对流传热[J]. *西安交通大学学报*, 1980, 14(3): 115-131.  
YANG Shiming. Free convections of heat outside slender vertical cylinders and inside vertical tubes[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1980, 14(3): 115-131. (in Chinese)
- [19] 何燕, 张晓光, 孟祥文. 传热学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.

---

(上接第 534 页)

- [18] 段萍, 王旭, 丁承军, 等. 基于 IMF 奇异值熵和 t-SNE 的滚动轴承故障识别[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(3): 134-137.  
DUAN Ping, WANG Xu, DING Chengjun, et al. Rolling bearing fault identification based on IMF singular value entropy and t-SNE [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(3): 134-137. (in Chinese)
- [19] ELSHENAWY L M, CHAKOUR C, MAHMOUD T A. Fault detection and diagnosis strategy based on k-nearest neighbors and fuzzy C-means clustering algorithm for industrial processes[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2022, 359(13): 7115-7139.
- [20] 崔亮, 徐玉冰, 程耀瑜. 一种改进的 FCM 聚类算法在噪声图像分割中的应用[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(1): 76-82.  
CUI Liang, XU Yubing, CHENG Yaoyu. Application of an improved FCM clustering algorithm in noise image segmentation[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2016, 37(1): 76-82. (in Chinese)