

YAN Lihui, LIU Heshan, BIAN Xing, LUO Ziren. Design and Verification of Temperature Measurement Bridge Excitation Source in the Taiji Program (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 829–837. CSTR:32142.14.cjss.2024-0040. DOI:10.11728/cjss2025.03.2024-0040

太极计划中的测温电桥激励源设计与验证*

言立慧^{1,2,3,4} 刘河山⁴ 边星^{3,4} 罗子人^{1,3,4}

1(国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院 杭州 310024)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 热扰动是空间引力波探测最重要的干扰来源之一,为满足中国空间引力波探测太极计划的需求,需要保证探测器光学干涉平台所在区域温度波动优于 $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ @ $0.1 \text{ mHz}\sim 1 \text{ Hz}$, 这需要 $\mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的温度测量技术. 针对空间引力波探测对高分辨率测温技术的需求,研制了一套基于惠斯通电桥的多激励源的测温电桥实验装置. 讨论了测温电桥的激励源及其他组件的设计方案,并进行了恒压源、恒流源和交流源激励下的测温电桥本底噪声的实验验证. 结果表明,在三种激励源分别激励电桥时,交流源结合锁相读出技术相较其他两种激励源能够达到更低的本底噪声,且在 $30 \text{ mHz}\sim 1 \text{ Hz}$ 频率范围内的噪声优于 $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,基本能满足太极探路者号的指标要求,对太极计划后续 $\mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 级温度测量系统的研制提供了重要参考.

关键词 太极计划, 温度测量, 激励源, 本底噪声

中图分类号 TH811, V447

Design and Verification of Temperature Measurement Bridge Excitation Source in the Taiji Program

YAN Lihui^{1,2,3,4} LIU Heshan⁴ BIAN Xing^{3,4} LUO Ziren^{1,3,4}

1(School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024)

2(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

4(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Thermal disturbance is one of the most important sources of interference for spatial gravitational wave detection. To meet the needs of the Taiji program for spatial gravitational wave detection, it is necessary to ensure that the temperature fluctuation in the area where the detector's optical interference platform is located is better than $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ at frequencies between 0.1 mHz and 1 Hz . This re-

* 国家重点研发计划项目资助 (2020YFC2200104)

2024-03-13 收到原稿, 2024-04-15 收到修定稿

quires $\mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ temperature measurement technology. In response to the need for high-resolution temperature measurement technology in spatial gravitational wave detection, this paper has developed an experimental setup for a temperature measurement bridge with multiple excitation sources based on the Wheatstone bridge. The design of the excitation sources and other components of the temperature measurement bridge is discussed, and experimental verification of the noise floor of the temperature measurement bridge under excitation from constant voltage sources, constant current sources, and alternating current sources is conducted. The experimental results show that when the bridge is excited by the three excitation sources, the alternating current source combined with phase-locked readout technology can achieve lower background noise compared to the other two excitation sources. The noise is better than $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ in the frequency range of 30 mHz to 1 Hz, basically meeting the requirements of the Taiji Pathfinder. This provides an important reference for the subsequent development of the $\mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ -level temperature measurement system for the Taiji program.

Key words Taiji program, Temperature measurement, Excitation source, Noise floor

0 引言

中国空间引力波探测太极计划^[1,2]预计在2030年前后发射三颗卫星,组成探测臂长百万公里量级的等边三角形,利用激光干涉技术,测量相距数百万公里两点之间皮米量级的位移变化,以探测中低频段的引力波信号^[3]。

空间引力波探测器会受到力、热、电及磁等各种噪声的干扰,其中与温度相关的效应是最主要的干扰源之一^[4]。温度波动会影响激光器频率、光学元件折射率^[5]、偏振元件消光比、偏振平面和光程等,引起位移测量噪声^[6]。为了满足太极计划的需求,光学干涉平台温度波动在0.1 mHz~1 Hz应优于 $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,对高精度温度测量系统有迫切需求^[7]。

测温系统主要包括温度传感器和信号读出系统。常见的温度传感器有热胀冷缩型温度计、红外温度计和电阻型温度计等^[8]。其中电阻型温度计灵敏度高、小巧、系统兼容性好、应用方便,结合电桥电阻测量,是应用型高分辨率温度测量系统的常用方案。例如,基于分压器和直流激励(电压、电流),Wudy等^[9]研制了一种负温度系数(Negative Temperature Coefficient, NTC)热敏电阻测温系统,其分辨率可以达到 $75 \mu\text{K}$ 。Lobo等^[10]采用NTC热敏电阻设计了一种基于交流惠斯通电桥的温度测量系统,在1~30 mHz频段内,测量噪声达到 $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$,且该系统已经在LISA Pathfinder上成功应用,并取得了良好的在轨验证结果。同时,LISA团队的Roma-Dollase等同样使用交流激励惠斯通电桥,在1 mHz频率处实现了

$1 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的测量噪声^[11]。此外,基于铂电阻的测温系统在太极一号上已有应用,并实现了1 mK的测温精度^[12]。

测温电桥主要由参考电阻、激励源、信号读出等部分组成,其中,激励源是系统中唯一的有源器件,是系统测量能力的重要影响因素。测温电桥较常用的激励方式有恒压源、恒流源和交流源等,恒压源激励系统简单,利用比例式测量法还可以消除激励源的噪声和漂移;恒流源激励可以降低由传感器带来的测量非线性误差;交流源激励可以通过信号调制方法甄别和消除部分干扰信号,并降低接触电势和温差电势等对测量的干扰。前述研究虽然涉及多种电桥激励方式,但系统其他部分的设计亦有较大差别,不足以证明某种激励方式的优越性,缺乏对比实验研究。因此需要设计专门的实验,尽量保持系统其他部分相同,仅改变激励方法,研究激励方法对测量的影响。

本文以惠斯通电桥为基础,设计并搭建了一套可切换激励源的温度测量实验装置,实验测量了不同激励源的效果,并对实验结果进行了分析。

1 惠斯通电桥测温原理

惠斯通电桥是常用的电阻测量电路,系统简洁,共模干扰抑制效果好^[13],合适的放大电路还能实现较高的分辨率^[14],被广泛应用于需要高分辨率测量电阻阻值变化的场景。

惠斯通电桥原理如图1所示^[15]。当电桥处于平衡状态时,电流在电桥中不流动,电桥输出 V_{out} 为0,则有如下关系式:

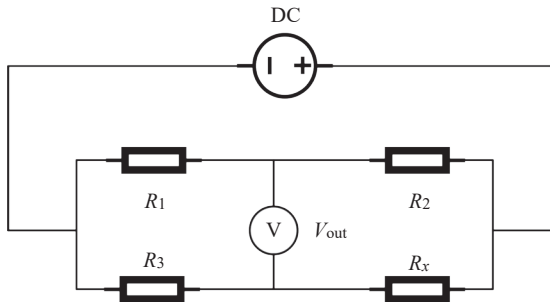


图 1 惠斯通电桥原理

Fig. 1 Scheme of Wheatstone bridge

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}. \quad (1)$$

而当电桥不平衡时, 输出 V_{out} 将不再等于 0. 若以恒定电压 V_{ref} 激励, 则满足如下关系式:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right). \quad (2)$$

推导后可得到未知电阻阻值 R_x 的计算公式, 即

$$R_x = \frac{R_2 R_3 + R_3 (R_1 + R_2) \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{ref}}}}{R_1 - (R_1 + R_2) \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{ref}}}}. \quad (3)$$

若以恒定电流 I 进行激励, 电桥不平衡状态则满足如下关系式:

$$V_{\text{out}} = I \left(\frac{R_1 R_x - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_x} \right). \quad (4)$$

推导可得到如下未知电阻阻值 R_x 的计算公式:

$$R_x = \frac{(R_1 + R_2 + R_3) \frac{V_{\text{out}}}{I} + R_2 R_3}{R_1 - \frac{V_{\text{out}}}{I}}. \quad (5)$$

当使用交流源激励时, 只需将电桥输出信号代入式 (3), 即可完成未知电阻阻值的计算. 据此, 可根据热电阻的阻值温度关系计算出相应的温度值.

2 测温电桥设计与构建

2.1 总体设计框架

基于惠斯通电桥的多激励源温度测量实验装置总体设计框架如图 2 所示. 系统由测温通道切换模块、激励源模块、激励源切换模块、前端电路模块、信号处理模块和主控模块组成.

其中测温通道切换模块用于连接多个测温传感器, 根据需求进行通道切换; 激励源模块可以在交流

源电压源、恒压源和恒流源三种激励方式间切换; 前端电路模块即惠斯通电桥电路; 信号处理模块包括两个信号处理分路和一个模数转换器 (Analog-to-Digital Converters, ADC), 对恒压源和恒流源激励电桥产生的信号直接使用放大器放大, 而对交流源激励电桥产生的交流信号使用锁相放大结构 (Lock-In Amplifiers, LIA) 处理, 处理后的信号由 ADC 读取; 主控模块则包括主控单元 (Master Control Unit, MCU) 最小子系统和通信接口, 负责 ADC 数据的接收、校验及封装, 并驱动和控制整个测温电桥的硬件, 同时可以实现电桥硬件和上位机软件的通信.

2.2 多通道切换模块设计

空间引力波探测光学系统需要保持整个光学平台的温度稳定, 以及进行多点温度测量, 因此测温系统需要具备多个测量通道. 多通道温度测量可以通过一个电桥对应多温度传感器或多个电桥各对应一个温度传感器实现. 由于卫星内部空间和资源有限, 为了降低系统体积和重量, 选用单个电桥对应多个温度传感器的方案, 并设计了测量通道切换模块.

多通道切换模块主要由温度传感器和开关器组成. 通道切换可使用模拟电子开关或继电器. 模拟电子开关速度快, 但是存在电流泄漏和通道间串扰问题, 特别是通道数较多时, 其影响不可忽略. 继电器是机械结构, 工作状态稳定, 不存在电流泄漏, 因此, 为尽量排除实验的其他影响因素, 本实验以继电器作为通道切换开关.

传感器方面, 电阻型温度传感器主要包括热敏电阻和铂电阻, 热敏电阻一般由半导体材料制成, 通常具有负温度系数, 灵敏度较高. 以 55036 热敏电阻为例, 其阻值和温度的关系为^[16]

$$R_t = R_0 e^{\beta(T^{-1} - T_0^{-1})}. \quad (6)$$

其中, β 为热敏电阻材料的常数; R_0 为 298.15 K 下热敏电阻的阻值; T 为当前温度, 单位 K; T_0 为 298.15 K.

金属铂电阻温度传感器由金属铂线或薄膜制成, 稳定性较好, 适用温区广, 是应用最广泛的温度传感器之一. 在 273.15~903.15 K 温度范围内, 铂电阻阻值和温度的关系为^[17]

$$R_t = R_0 (1 + AT + BT^2). \quad (7)$$

其中, A 和 B 均为常数, 由铂电阻自身特性决定; R_0 为铂电阻在 273.15 K 下的阻值; T 为当前温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$.

热敏电阻灵敏度更高, 但铂电阻稳定性更好, 更

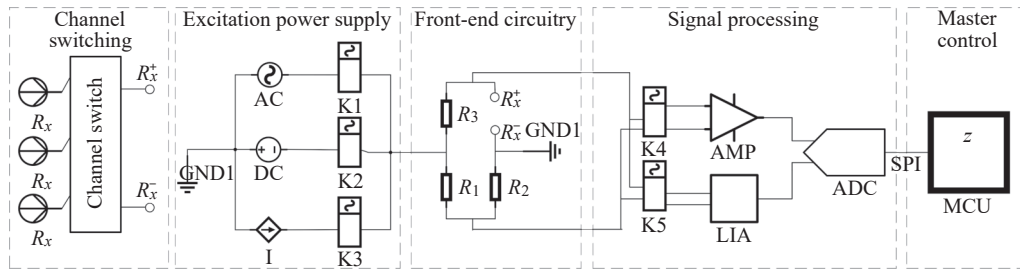


图2 温度测量装置总体框架

Fig. 2 Framework of temperature measuring system

有利于空间引力波探测所侧重的低频信号测量. 因此, 本实验中选用 A 级 PT1000 铂电阻作为温度传感器, 其 A 值及 B 值分别约为 0.0038623 和 -0.00000065315, 精度为 $0.30 + 0.005|t|$ (t 为实际温度).

如图 3 所示, 将不同测温通道对应的铂电阻接在不同的继电器上, 并将继电器通道连接在前端电路总线上. 若需要打开某一通道, 只需闭合特定通道的继电器, 并断开其他所有继电器即可.

2.3 激励电源模块设计

激励电源模块负责为电桥提供激励信号, 当电阻 R_x 阻值变化时, 电桥产生不平衡信号 V_{out} . 针对本实验核心目标, 为研究不同激励源对测温系统性能的影响, 设计三种激励方案, 即恒压源、恒流源和交流源.

2.3.1 恒压源电路

恒压源是惠斯通电桥典型的激励方式, 除了结构简单外, 还能通过将恒压源同时用作 ADC 的参考电源实现比例测量^[18], 以降低激励源漂移和噪声的影响.

实验中恒压源芯片使用 ADR4550, 输出 5 V 标准电压, 精度不低于 $\pm 0.02\%$, 温度系数、输出波动分别为 $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 $1 \mu\text{V}$ (峰-峰值电压). 由式 (3) 和式 (5) 可知, R_x 计算结果直接受激励电源的影响. 当激励电源产生波动时, 对应 R_x 的计算结果也会产生波动. 电桥输出波动与电压源波动的关系如下:

$$\Delta V_{out} = \Delta V_{ref} \left(\frac{R_x}{R_3 + R_x} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right). \quad (8)$$

假设该测温电桥电阻 R_1 和 R_3 阻值为 10 K, 电阻 R_2 阻值为 1 K, R_x 为 PT1000 铂电阻. 电桥所处环境温度从 273.15 K 变化至 273.45 K, 铂电阻阻值变化约为 1.17Ω , 对应电桥输出电压为 0.48 mV. 可计算出由电源电压波动引起的电桥输出波动约为 1 nV, 等效温度变化为 $6 \mu\text{K}$, 不影响实际测量结果.

2.3.2 恒流源电路

恒流源激励是指在电路中提供一个稳定不变的

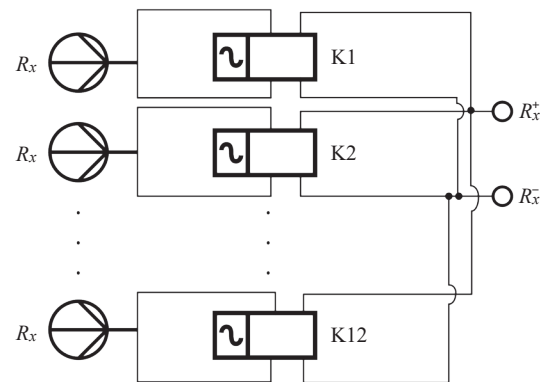


图3 多通道切换电路

Fig. 3 Multi-channel switching circuit

电流, 如果桥路中电阻阻值发生变化, 激励源会调整输出电压以保证电流恒定.

恒流源产生电路有多种设计方式, 为了减少共地噪声对测量产生的影响, 实验采用浮地式的恒流源产生电路. 根据式 (4), 激励电流越大则测量信号越大, 但电阻型测温元件有自热效应, 电流过大会影响测量结果. 因此, 该电路利用 ADR4525 芯片产生 2.5 V 的恒定电压作为运算放大器 VIN+ 的输入, 将其恒流源输出控制在 $10 \mu\text{A}$. 经过实际测试, 该电流源输出波动约为 $0.1 \mu\text{A}$.

同样假设该测温电桥所处环境温度从 273.15 K 变化至 273.45 K 时, 电阻 R_1 和 R_3 阻值为 10 K, 电阻 R_2 阻值为 1 K, 且 R_x 为 PT1000 铂电阻, 据式 (4) 可计算出电流源对应电桥输出约为 $7.77 \mu\text{V}$. 由电流波动引起的电桥输出波动约为 $0.078 \mu\text{V}$, 等效温度变化约为 4 mK, 会对电桥的测试结果产生影响. 因此, 为了提高恒流源激励电桥时的性能, 将电流源接入 ADC 芯片的参考电源端, 组成比例式测量电路. 比例式测量电路如图 4 所示. 由图 4 可知比例式测量的实施方法, 即在测量过程中, 电桥激励源与

ADC 参考电压共享同一基准. 当电桥激励源出现波动时, 这种波动同样会作用于 ADC 的参考电压, 从而有效地减少了激励源噪声和漂移对测量结果的不良影响. 实际电路中, 可能需要根据 ADC 参考电压的要求对电压基准进行放大.

2.3.3 交流源电路

交流源激励电桥是指利用数模转换单元 (Digital-to-Analog Converter, DAC) 输出一个稳定的正弦信号, 作为电桥的激励信号. 本文中交流源输出使用的是 16 位数模转换器 DAC8811, 输出一个 5 V 电压信号. 为降低寄生电容^[19]、电感等的影响, 激励信号频率设置为 3 Hz.

DAC8811 的外围电路原理如图 5 所示. 同样假设该测温电桥所处环境温度从 273.15 K 变化至 273.45 K 时, 电阻 R_1 和 R_3 阻值为 10 K, 电阻 R_2 阻值为 1 K, 且 R_x 为 A 级 PT1000 铂电阻, 由式 (2) 计算出的电桥输出约为 0.34 mV. 图 5 中先使用放大器 OP277 为 DAC8811 提供 -2.5 V 参考, 随后将 DAC8811 的输出接入另一个 OP277 中, 使其能够输出稳定和准确的 $0 \sim \pm 2.5$ V 信号, 满足系统设计需求.

2.4 前端电路设计

前端电路的核心为惠斯通电桥, 噪声主要来源于桥臂电阻的温度系数和阻值的精度. 由于温度的波动会直接影响电阻的阻值, 进而改变电桥的平衡状态, 这可能会产生无法精确标定的误差. 假设电桥中所有电阻均为标准电阻, 电阻的温度系数为 k , 一段时间的温度波动为 Δt . 在考虑桥臂电阻温度系数的情况下, 可以将电桥平衡条件写为

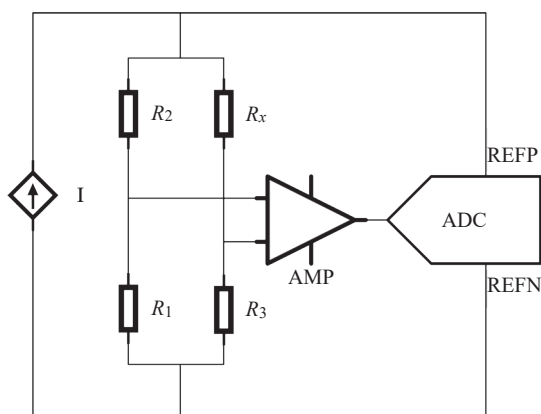


图 4 恒流源比例式测量法

Fig. 4 Proportional measurement for constant current sources

$$\frac{R_1 + kR_1\Delta t}{R_2 + kR_2\Delta t} = \frac{R_3 + kR_3\Delta t}{R_x + kR_x\Delta t}. \quad (9)$$

式 (9) 可简化为

$$R_1R_x - R_2R_3 = 2kR_2R_3\Delta t + k^2R_2R_3\Delta t^2 - 2kR_1R_x\Delta t - k^2R_1R_x\Delta t^2. \quad (10)$$

由式 (10), 可将式 (2) 写为如下形式:

$$\Delta V_{out} = V_{ref} (2k\Delta t + k^2\Delta t^2) \frac{(R_2R_3 - R_1R_x)}{(R_3 + R_x)(R_1 + R_2)}. \quad (11)$$

标准电阻的温度系数越小, 由桥臂电阻造成的影响越小. 环境温度波动会引起参考电阻阻值变化, 当测温电桥处于温度波动环境中时, 会导致电阻阻值变化的差异. 但由于电桥的抗共模特性, 桥臂电阻的对称变化并不会引起电桥输出变化. 但环境温度不可避免地存在温度梯度, 且各个参考电阻的温度系数也不完全相同, 这会引起桥臂电阻的非对称变化, 影响电桥输出. 所以在设计惠斯通电桥时选用了高精度、超低温漂的金属薄膜电阻, 阻值分别为 1 k Ω 和 10 k Ω , 其温度系数和精度分别为 $0.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 50×10^{-10} .

2.5 信号处理电路设计

信号处理电路的主要功能是提高电桥输出信号的信噪比, 具体包括直流信号的放大、交流信号的整流以及信号读出等.

在实验过程中, 由于温度波动相对较小, 铂电阻阻值变化所引发的电桥不平衡输出可能会极其微弱, 导致信号的信噪比较低、抗干扰能力差. 为了获得准确的测量结果, 在电桥中使用了高精度、低噪声的仪表放大器 AD8422, 且放大器前端电路结构设计了电阻电容 (Resistor-Capacitor, RC) 滤波器, 通过该电路提高直流信号的信噪比以及抗干扰能力, 使信号更容易被检测和分析. 放大器 AD8422 外围电路原理如

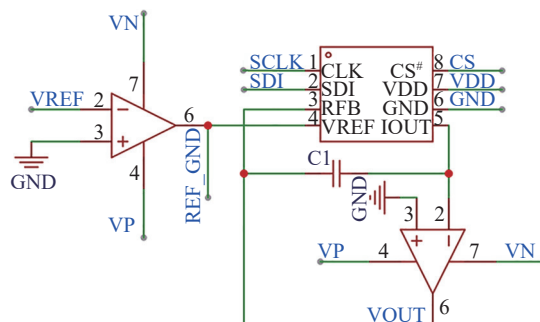


图 5 DAC8811 外围电路原理

Fig. 5 Schematic diagram of the DAC8811

图 6 所示. 图 6 中先使信号经过 RC 滤波结构, 滤除对应频段的噪声 (滤波截止频率可通过配置电容、电阻值来设置), 再将滤波后的信号输入仪表放大器 AD8422, 从而完成信号放大.

测温电桥如果使用交流激励, 其输出同样是交流信号, 而交流信号的处理使用锁相放大技术^[20]会更加方便. 假设交流激励源 V_{ref} 信号为 $V_0 \cos \omega t$, 电桥输出 V_{out} 为 $V_0 \cos \omega t$. 将电桥输出与激励信号相乘, 得到信号表达式 $V_i V_0 / 2 - V_i V_0 \cos(2\omega t) / 2$, 经过低通滤波处理得到与电桥输出电压成正比的直流信号, 使得仅有频率与激励信号相同的噪声才会影响到该电路的输出, 因此锁相放大技术可以大大降低电桥输出信号的干扰. 本系统主要使用逻辑锁相环 CD74 H、运算放大器 OP07 CSZ 实现信号的锁相放大.

放大电路输出信号需转换为数字信号, 为了实现高分辨率的温度测量, 模数转换器 ADC 至少应该具有 18 位的有效位数. 同时, 考虑到恒流源激励测试中会采集差分电压, 选择了 ADS131 A02 芯片. 该芯片具有最高 24 位的分辨率, 可以满足实验需求.

2.6 主控电路和软件设计

主控模块设计分为硬件电路和嵌入式软件, 硬件主要包括 STM32 F103 RBT6 最小子系统的外围硬件电路, 如晶振、供电电源、程序烧录接口、复位电路以及负责上位机通信的 USB 转串口芯片 CH340 G 电路等.

主控设计的核心在于嵌入式软件, 其起到测量通道切换、激励源切换、DAC 输出控制、ADC 采样切换、ADC 采样时序控制、数据封装和校验、上位机通信等作用. 嵌入式软件运行流程如图 7 所示.

硬件电路通电后, 首先执行 STM32 芯片的初始化代码, 用于配置系统时钟等. 随后按照 ADC 的初

始化流程发送对应命令, 来设置 ADC 的采样频率、增益倍数、参考电源等. 上述工作完成后, 若主控未收到上位机中断, 则会进入到低功耗模式, 如果收到了上位机的指令, 将会对指令进行解析, 确定激励源和通道. 如果选择的是恒压源或恒流源激励, 系统将对信号直接放大, 否则对信号进行锁相放大. 信号处理流程完毕后, 进入 ADC 采样时序, 完成模拟信号到数字信号的转换. ADC 完成采样后, 主控芯片会对数据进行校验、封装和发送. 如果是单次采样, 采样结束会重新进入到 STM32 芯片的低功耗模式, 否则将持续采样, 直到收到新的上位机指令为止. 此外, 为了减少随机噪声, 软件中应用了中值滤波算法^[21].

经过上述所有设计步骤后, 使用 EDA 工具制作出的多激励源测温电桥如图 8 所示. 为了尽可能地降低电桥本底噪声、平衡电路板体积, 将测温电桥分成 5 块印制电路板 (Printed Circuit Board, PCB), 分别是多通道切换板、激励电源板、前端电路板、信号处理板和主控板, 且各个板间通过排针排母依次连接.

3 测温电桥测试与验证

3.1 测试方法

为检验电路系统噪声指标, 降低真实环境温度变化引起的电路输出波动, 测温电桥中的铂电阻 R_x 被替换为标准电阻, 随后进行了不同条件下、使用不同激励源的测量实验.

本文的测试环境有两种. 一种是温度波动约 5 K (24 h) 的大气环境, 另一种是相同环境下气压约 10 Pa 的真空罐内, 如图 9 所示.

3.2 结果与讨论

大气环境中测温电桥在三种激励源激励下的本底噪声结果如图 10 所示. 真空环境中测温电桥在三种不同激励源激励下的本底噪声结果如图 11 所示.

对比图 10 和 11, 当使用恒流源激励测温电桥时, 无论在大气环境还是真空环境中, 其基底噪声结果基本一致, 即全频段噪声均高于 $100 \mu\text{K} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 这表明, 恒流源激励测温电桥的噪声主要来自其本身, 而非环境因素, 恒流源激励方法的改进重点在于抑制恒流源本身的噪声水平, 或通过同步采集恒流源输出, 记录其波动, 在数据处理中进行扣除. 当采用恒压源激励测温电桥时, 真空环境对于 10 mHz~1 Hz 频段内的噪声有一定的压制作用, 这表明环境温度是恒压源噪

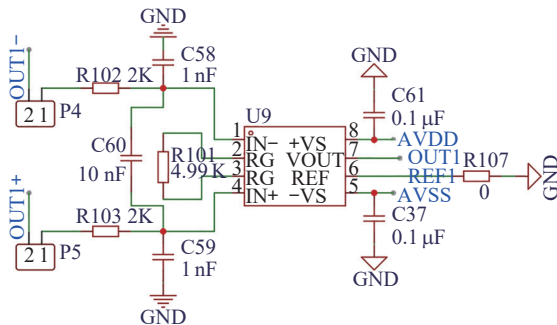


图 6 AD8422 外围电路原理

Fig. 6 Schematic diagram of the AD8422

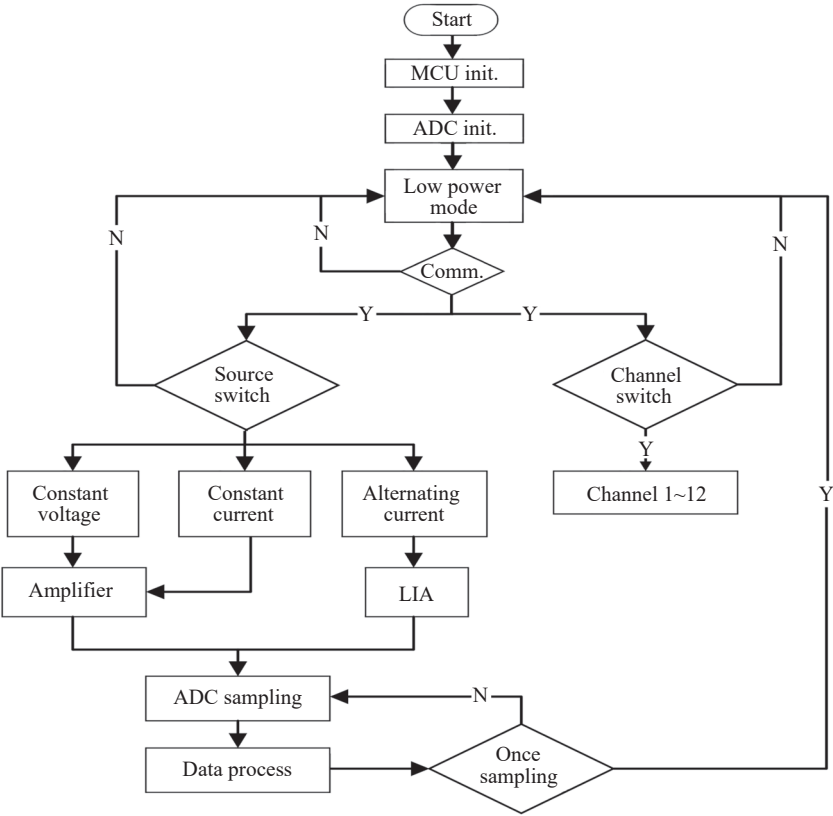


图 7 软件流程

Fig. 7 Software flowchart

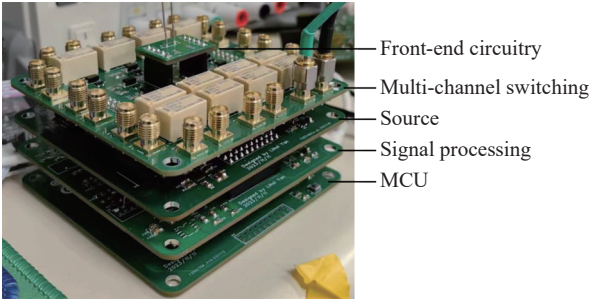


图 8 测温电桥实物

Fig. 8 Wheatstone bridge

声水平的影响因素, 但真空环境对更低频率的波动改善有限, 可能是因为真空环境对更低频率的温度波动抑制作用有限.

无论是在大气环境中还是真空环境中, 交流源激励电桥均表现出最低的本底噪声. 在 $1\text{ mHz} \sim 1\text{ Hz}$ 频段内, 其噪声水平基本低于 $100\text{ }\mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 这是因为在使用交流源激励测温电桥时结合了锁相放大技术, 通过信号的调制和解调, 有效地滤除了大部分环境噪声. 另外, 本研究激励源同时为电桥提供激

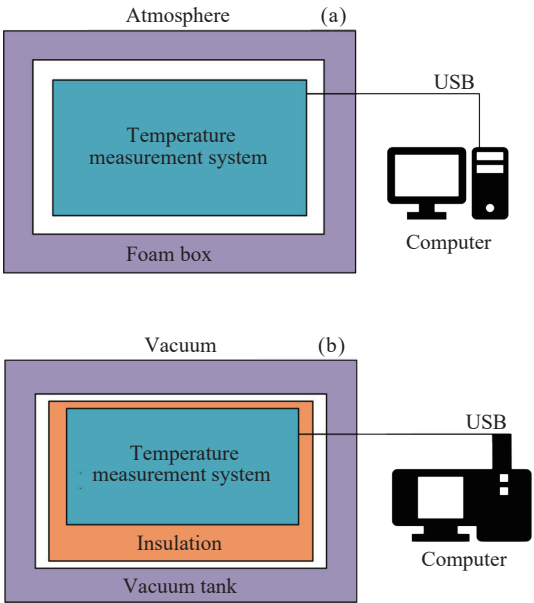


图 9 实验环境

Fig. 9 Experimental environment

励信号, 并为锁相放大电路提供参考信号, 激励源输出波动对电桥输出和锁相放大电路参考输入的影响

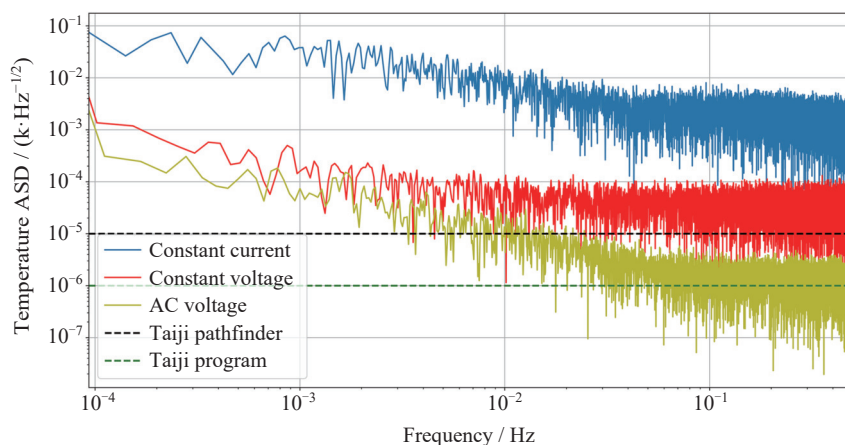


图 10 大气环境下的本底噪声结果

Fig. 10 Results of substrate noise in atmospheric environment

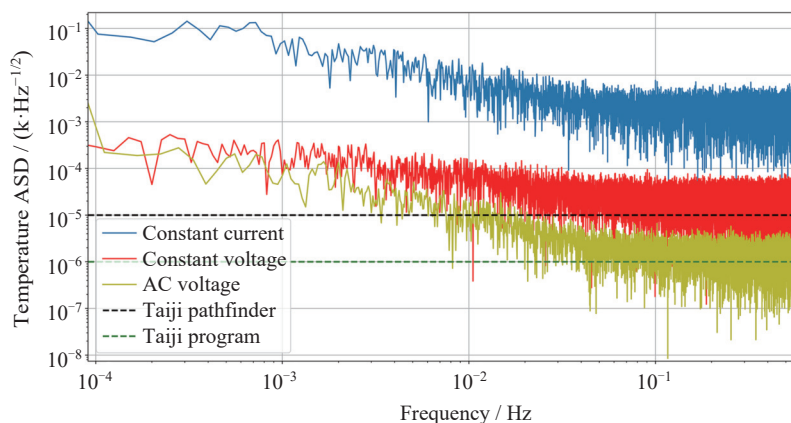


图 11 真空环境下的本底噪声结果

Fig. 11 Results of substrate noise in vacuum environment

是等比例的, 不会影响锁相放大电路输出结果. 因此, 无论是在大气环境还是真空环境中, 采用交流源激励的测温电桥都展现出了较为一致的本底噪声. 特别是在 30 mHz~1 Hz 的频率范围内, 其噪声水平已经低于 $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 在当前的系统设计情况下, 交流源激励是实现低噪声测量的优选方案.

4 结论

研究设计了一种专门研究激励源对惠斯通电桥式测温系统测量噪声影响的实验装置, 并基于该装置对恒流、恒压和低频交流激励三种激励方案进行了实验研究, 得出以下结论.

(1) 研究采用的恒流源激励方案无论在大气或真空条件下均无法获得有意测温噪声水平, 其主要原因

在于恒流源自身噪声, 该方案继续研究意义有限.

(2) 恒压源激励方案真空环境本底噪声略好于大气环境, 约为 $100 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ @ 10 mHz~1 Hz, 环境因素影响有限, 主要噪声来源仍为激励源本身, 预计通过采用比例式测量方法可改善其噪声水平.

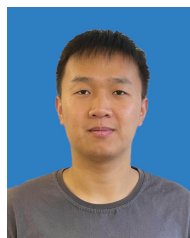
(3) 交流源激励结合锁相放大读出方案本底噪声可降低至低于 $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ @ 30 mHz~1 Hz, 能够在 30 mHz~1 Hz 频段内满足太极探路者号对测温系统 $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ @ 0.1 mHz~1 Hz 的噪声要求. 主要是由于信号调制, 并将激励源同时用于信号调制和锁相放大电路的信号参考, 排除了部分环境干扰和激励源本身波动的影响. 因此, 对于本文所述的惠斯通电桥测温方案, 低频交流激励结合锁相放大读出方案最具研究价值. 但是, 0.1~30 mHz 频段噪声水平仍然未能达到目标, 这可能与实验系统后端电路所处环

境的波动有关. 未来将尝试为后端电路提供温度控制等, 抑制后端电路环境扰动, 进一步甄别和抑制噪声来源, 改善低频噪声.

参考文献

- [1] LUO Ziren, BAI Shan, BIAN Xing, *et al.* Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, **43**(4): 415-447
- [2] WU Yueliang, HU Wenrui, WANG Jianyu, *et al.* Review and scientific objectives of spaceborne gravitational wave detection missions[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 589-599 (吴岳良, 胡文瑞, 王建宇, 等. 空间引力波探测综述与拟解决的科学问题 [J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(4): 589-599)
- [3] LUO Ziren, ZHANG Min, JIN Gang, *et al.* Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, **7**(1): 3-10
- [4] WANG Tan, HE Siyi, XU Jiawen. Review of noise suppressing technologies for gravitational-waves detection[J]. *Progress in Astronomy*, 2022, **40**(4): 556-574
- [5] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, *et al.* TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, **33**(3): 035010
- [6] DEHNE M, TRÖBS M, HEINZEL G, *et al.* Verification of polarising optics for the LISA optical bench[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(25): 27273-27287
- [7] CHEN K, ZHANG X F, GUO T, *et al.* Key technologies analysis and design of ultra-clean & ultra-stable spacecraft for gravitational wave detection[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, **36**(11n12): 2140021
- [8] ZHAO Y Z, BERGMANN J H M. Non-contact infrared thermometers and thermal scanners for human body temperature monitoring: a systematic review[J]. *Sensors*, 2023, **23**(17): 7439
- [9] WUDY F E, MOOSBAUER D J, MULTERER M, *et al.* Fast micro-Kelvin resolution thermometer based on NTC thermistors[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2011, **56**(12): 4823-4828
- [10] LOBO A, NOFRARIAS M, SANJUAN J. Thermal diagnostics for LTP[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, **22**(10): S171-S176
- [11] ROMA-DOLLASE D, GUALANI V, GOHLKE M, *et al.* Resistive-based micro-kelvin temperature resolution for ultra-stable space experiments[J]. *Sensors*, 2022, **23**(1): 145
- [12] LIU Hong, ZHANG Xiaofeng, FENG Jianchao, *et al.* Application of precision thermal control techniques in Taiji-1 satellite[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(2): 337-341 (刘红, 张晓峰, 冯建朝, 等. 精密热控技术在太极一号卫星上的应用 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(2): 337-341)
- [13] DAI Guohong, XU Yihua, WU Qingfeng, *et al.* Strain measurement sensitivity based on Wheatstone bridge[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2022, **46**(1): 66-71
- [14] GHOSH S, MUKHERJEE A, SAHOO K, *et al.* A novel sensitivity enhancement technique employing wheatstone's bridge for strain and temperature measurement[C]//Proceedings of the 2015 Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT). Hooghly: IEEE, 2015: 1-6
- [15] SANJUÁN J, LOBO A, NOFRARIAS M, *et al.* Thermal diagnostics front-end electronics for LISA Pathfinder[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, **78**(10): 104904
- [16] ALEKSIĆ O S, RADOJČIĆ B M, RAMOVIĆ R M. Modeling and simulation of NTC thick film thermistor geometries[J]. *Microelectronics International*, 2007, **24**(1): 27-34
- [17] SARKAR S. Platinum RTD sensor based multi-channel high-precision temperature measurement system for temperature range -100°C to $+100^{\circ}\text{C}$ using single quartic function[J]. *Cogent Engineering*, 2018, **5**(1): 1558687
- [18] MCCARTHY M, MCCARTHY A. ADC Requirements for RTD Temperature Measurement Systems[J]. *Electronics Today*, 2016(4): 31-33
- [19] MENG W J, ZHANG F H, DONG G D, *et al.* Research on losses of PCB parasitic capacitance for GaN-based full bridge converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, **36**(4): 4287-4299
- [20] DE GRAAF G, WOLFFENBUTTEL R F. Lock-in amplifier techniques for low-frequency modulated sensor applications[C]//2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Graz: IEEE, 2012: 1745-1749
- [21] LIU H, LIU W H. An improved adaptive time difference estimation method based on median filter in impulse environment[J]. *International Journal of Information and Communication Sciences*, 2021, **6**(3): 66-74

作者简介



言立慧 男, 1997 年生于河北承德, 硕士, 现就读于中国科学院大学, 主要从事引力波探测器高分辨率温度测量技术研究.
E-mail: yanlihui21@mailsucas.ac.cn



罗子人 (通信作者) 男, 1980 生于湖南长沙, 博士, 研究员, 2010 年于中国科学院数学与系统科学研究院获得理学博士学位, 现为中国科学院力学研究所研究员, 太极计划首席科学家助理, 主要从事引力波探测的空间激光干涉测距技术的理论分析和方案设计方面的研究.
E-mail: luoziren@imech.ac.cn