

基于国民技术 MCU 全国产测温模块设计

刘荆飞,任宝利,廖中亮,余 翔

(三峡智控科技有限公司,湖北 武汉 430070)

摘要:设计一种基于全国产化器件的热电阻测量模块,采用国民技术 MCU 作为处理器,瑞盟科技 MS5194T 作为测温芯片,使用 CA-IS3742HW 隔离,模块可热拔插,采用多路全双工串行 422 实现与其他模块间的数据交互,通过 MCU 的 GPIO 引脚连接到通信芯片使能信号来控制模块的发送,避免其他模块接收到不正确的数据。分析了二线接法、三线接法和四线接法方式以及误差,提出激励电流交换通道同时测量 REF 电阻两端电压并采用同一参考电压来测量热电阻的方法,通过高低温试验验证了其可行性和准确性。该模块全部基于全国产化元器件,保证了芯片供应链安全。

关键词:热电阻;高精度;三线制;温度采集;国产化;MCU

中图分类号:TP212

文章编号:1000-0682(2024)01-0025-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.01.006

Design of domestic production temperature measurement module based on national technology MCU

LIU Jingfei, REN Baoli, LIAO Zhongliang, YU Xiang

(Three Gorges Intelligent Industrial Control Technology CO., LTD., Hubei Wuhan 430070, China)

Abstract: Design a thermal resistance measurement module based on the domestic chips, using N32G45X MCU as a processor and Ruimeng MS5194T as temperature measuring chip, using CA-IS3742HW isolation, the module has the ability of hot-plug, using full-duplex serial 422 realize data communication with other modules, through the MCU GPIO pin connected to the communication chip enable send signal to control the module, avoid other modules from receiving incorrect data. Analysis of second line wiring, three line wiring, four wire wiring mode and error, exchange constant exciting current channel while measuring the REF resistance terminal voltage and using the same reference voltage to measure the thermal resistance, through the high and low temperature test verify its feasibility and accuracy, the module all based on the domestic components, ensure the security of the chip supply chain.

Keywords: thermal resistance; high precision; three-line wiring; temperature acquisition; domestic production; MCU

0 引言

温度是工业生产过程中的一项重要测量值,其测量的准确性和精确性直接影响着控制系统的运行质量以及产品的生产质量^[1-3]。温度测量模块是可编程控制器(PLC)行业中必不可少的测量单元^[4],其在水利发电厂、泵站、闸门、工业自动化及计算机监控系统等领域有着广泛的应用。在严峻的外部环境和芯片国产化应用的推动下,研制采用国产芯片

的测温模块对工业安全的自主可控具有重大意义,这对测温模块设计形成困难^[5-8]。

测温模块通常采用国外成熟的 STM32 MCU 和 AD5594 模数转换器实现测温功能^[9-11]。近年来,国内涌现出许多优秀的半导体企业,国民技术 MCU、瑞盟科技模拟测量等设计出的芯片逐渐被大家熟知^[12]。该文采用国产 32 位 ARM 核 MCU,以 N32G45X 为核心读取 4 路热电阻两端电压值和 1 路参考电压值,实现多路温度的测量。

1 硬件设计

热电阻测温模块的主要功能是通过多个热电阻

收稿日期:2023-08-16

第一作者:刘荆飞(1976—),男,江西安义人,硕士,工程师,主要研究方向为自动化控制设备研发。E-mail:592673883@qq.com

测量温度,工业中常使用的热电阻是 PT100 和 PT1000;PT100 温度系数是 $0.385\ \Omega/^{\circ}\text{C}$,PT1000 更为灵敏^[13-15]。采用国民技术 N32G45X 作为核心处理器,2 个瑞盟科技 MS5194T 芯片读取 8 个通道热电阻温度,通过圣邦微单极八进制模拟开关

SGM4518XS16G/TR 切换测量通道。模块测量值通过全双工差分 RS422 总线接口与 CPU 模块实现数据交互,RS422 总线具有抗干扰性强、全双工实时以及成本低等优点。测温模块硬件框图如图 1 所示。

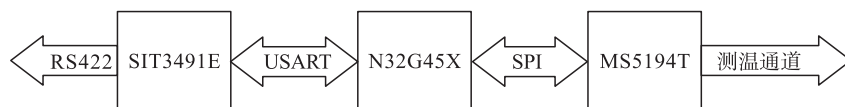


图 1 测温模块硬件框图

1.1 MCU

N32G45X 系列是全国产化的面向实时控制的高性能 32 位 ARM Cortex-M4F 内核 MCU 芯片,最高工作主频 144 MHz,180DMIPS,支持浮点运算和 DSP 指令,单周期硬件乘法指令,集成多达 512 KB Flash,144 KB SRAM,2 个 12 位 5 Msps 的 ADC 通道,2 个 12 位 1 Msps ADC 通道,内置密码算法硬件加速引擎。3 个 USART 接口和 4 个 UART 接口,最高速率达 4.5 Mbps;3 个速率高达 36 MHz 的 SPI 接口,还有 1 个 QSPI 及 I²C 等接口。

1.2 MS5194T

瑞盟科技 MS5194T/MS5195T 是一款适合高精度

测量应用的低功耗、低噪声、六通道差分输入的 24 bit/16 bit 模数转换器。其内部集成了低噪声输入缓冲器、低噪声仪表放大器和精密低噪声、低漂移内部带隙基准,也可采用外部差分基准电压;其片内还集成可编程激励电流源, burnout 电流源和偏置电压发生器。输出数据频率可通过软件设置,数据更新速率为 4.17 ~ 470.00 Hz。MS5194T 原理如图 2 所示。

MS5194T 通道连接图如图 3 所示,外部通过模拟开关 SGM4518XS16G/TR 切换测量通道。以三线接法为例,选择不同通道的 RTD_x_INP 流过 AD_OUT1,RTD_x_INN 流过 AD_OUT2,同时用软件方式选择 MS5194T 内部的测量通道。

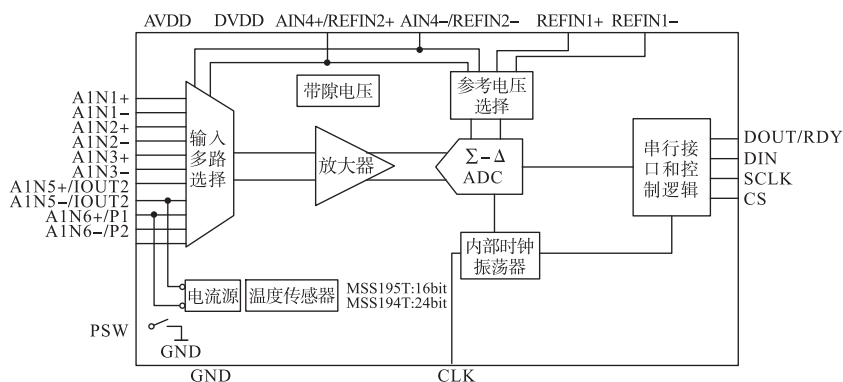


图 2 MS5194T 原理图

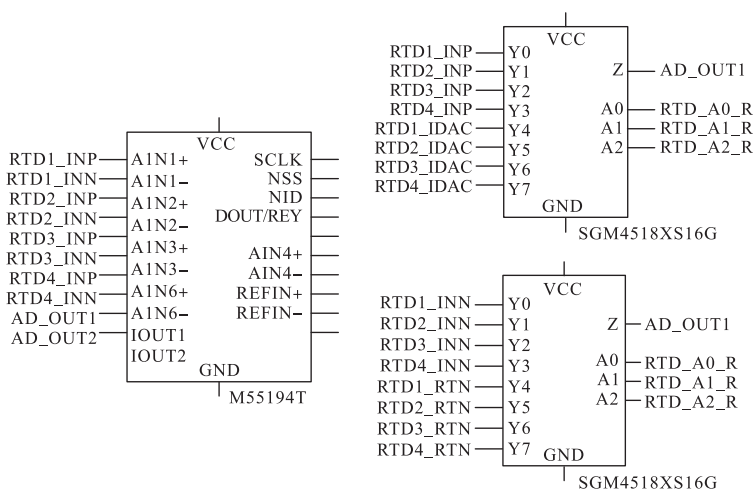


图 3 MS5194T 通道连接图

1.3 RS422

选用芯力特 SIT3491E RS422 通信芯片,在测温模块和 CPU 模块之间用川土微高速四通道数字隔离器 IS3742HW 隔离 RS422 总线,保证模块的带电拔插和通信抗干扰性。通过用 MCU GPIO 控制与通信芯片相连的隔离芯片使能信号来控制各模块的发送,如图 4 所示, TX_OE2 连至 SIT3491E 的发送使能 DE 引脚,避免多个模块连在同一个 RS422 总线时模块无法发送出正确的数据。当模块需要发送数据时,置 IS_EN2 为高电平,即使能发送引脚;当模块停止发送数据时,置 IS_EN2 为低电平,禁能发送引脚,否则会影响其他模块的数据发送,导致其他模块无法接收到正确的数据。

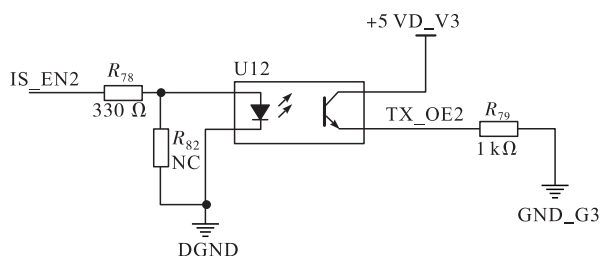


图 4 RS422 发送使能电路

2 软件设计

2.1 3 种热电阻接法

二线接法、三线接法和四线接法如图 5 所示。

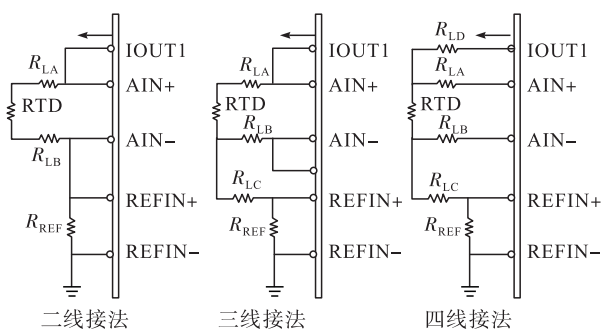


图 5 三种热电阻接法

2.2 二线接法

从二线接法图可推导出：

$$V_{RTD} = (R_{RTD} + R_{LA} + R_{LB}) * I_{OUT}$$

$$V_{REF} = R_{REF} * I_{OUT}$$

进而推导出：

$$R_{RTD} = V_{RTD} * R_{REF} / V_{REF} - (R_{LA} + R_{LB}) \quad (1)$$

从上式可以看出,图 5 中引线电阻 R_{LA} 和 R_{LB} 会增加与 RTD 元件串联的电阻,从而增大 VIN 输入两端的电压测量值,导致实际测量出的温度比施加的温度更高。直径为 0.5 cm 铜线的标称电阻为 0.08

Ω/m,引线长度为 5 m 的引线电阻约为 0.4 Ω,2 条引线的总引线电阻为 0.8 Ω,薄膜铂热电阻的温度系数约为 0.385 Ω/℃,因此可计算出,0.8 Ω 引线电阻产生的误差为 2.1 ℃。补偿此误差的唯一方法是手动加上一个偏差,但引线电阻会随温度变化而变化,因此在温度测量中引入一定的误差是无法避免的,引线越长,此误差将更为明显。

2.3 三线接法

从三线接法图可推导出：

$$V_{IN1} = (R_{LA} + R_{RTD}) * I_{OUT1} + (R_{LC} + R_{REF}) * (I_{OUT1} + I_{OUT2})$$

$$V_{IN2} = R_{LB} * I_{OUT2} + (R_{LC} + R_{REF}) * (I_{OUT1} + I_{OUT2})$$

$$V_{REFIN} = R_{REF} * (I_{OUT1} + I_{OUT2}) \quad (2)$$

结合 $I_{OUT1} = I_{OUT2}$ 和 $\Delta V_{IN} = V_{IN1} - V_{IN2}$,进而推导出：

$$R_{RTD} = 2 * \Delta V_{IN} * R_{REF} / V_{REF} + R_{LB} - R_{LA} \quad (3)$$

从上面的式子可以看出,接线电阻给温度测量带来误差,增加第 2 个激励电流 I_{OUT2} 主动补偿了引线电阻 R_{LC} ,接至 REF 的引线电阻 R_{LC} 随温度的变化也不再影响温度的测量,即不会给温度测量带来误差,还知道引线电阻 R_{LA} 和 R_{LB} 相互抵消。然而,引线电阻补偿后误差取决于 2 个引线电阻 R_{LA} 和 R_{LB} 是否相等。

直径为 0.5 cm 铜线的标称电阻为 0.08 Ω/m,引线长度为 5 m 的引线电阻约为 0.4 Ω,假设 2 个激励电流相等,2 条引线电阻相差 20% 时将给热电阻 RTD 测量产生 0.16 Ω 偏差,因此可计算出,因引线电阻失配带来的误差为 0.42 ℃。

考虑 I_{OUT1} 和 I_{OUT2} 电流失配时的情形,假设 $I_{OUT2} = R_{LB} * (1 + \alpha) I_{OUT1}$

进而推导出：

$$R_{RTD} = (2 + \alpha) R_{REF} * \Delta V_{IN} / V_{REF} + (1 + \alpha) R_{LB} - R_{LA}$$

激励电流 I_{OUT1} 和 I_{OUT2} 失配带来的误差与引线电阻和测量电阻均成正比,1% 电流失配给 100 Ω 热电阻和引线电阻 R_{LB} 带来的影响约为 1.04 Ω,给热电阻 RTD 测量产生的误差为 1.04/0.385 = 2.7 ℃,说明电流失配带来的误差比引线电阻带来的误差更大。

先把激励电流 I_{OUT1} 接至 AIN+, 激励电流 I_{OUT2} 接至 AIN-, 测量得到：

$$\Delta V_{IN1} = (R_{LA} + R_{RTD}) * I_{OUT1} - R_{LB} * I_{OUT2}$$

再把激励电流 I_{OUT1} 接至 AIN-, 激励电流 I_{OUT2} 接至 AIN+, 同样测量得到：

$$\Delta V_{IN2} = (R_{LA} + R_{RTD}) * I_{OUT2} - R_{LB} * I_{OUT1}$$

由上述式(2)可推导出:

$$\Delta V_{IN1} + \Delta V_{IN2} = (R_{LA} + R_{RTD} - R_{LB}) * (I_{OUT1} + I_{OUT2})$$
$$R_{RTD} = (\Delta V_{IN1} + \Delta V_{IN2}) * R_{REF} / V_{REF} + R_{LB} - R_{LA}$$

可以看出,热电阻测量误差与 α 没有关系,即与电流失配没有关系,只有引线电阻给热电阻测量带来误差,而且 2 条引线电阻是相互抵消的,在实际运行中要尽量做到 2 根引线基本同样长。但是需要 2 次测量,这对数据吞吐速率会有影响。

2.4 四线接法

从四线接法图可推导出:

$$\Delta V_{IN} = R_{RTD} * V_{REF} / R_{REF}$$

四线 RTD 接线是最准确的接线,常使用基准输入为 REFIN + 和 REFIN -, 1 条引线接至 REFIN + , 2 条引线接至 AIN + 和 AIN -, 1 条引线接至激励点电流源,这种接线的任何引线电阻不会对热电阻测量产生误差,但是其接线比较多。

2.5 软件流程

测温模块要兼顾两线、三线和四线这 3 种不同接线的方式,该模块支持 8 个 RTD 热电阻通道的测量,程序分时控制 SGM4518XS16G/TR 轮流 I_{OUT1} 或 I_{OUT2} 流过 8 个热电阻,同时控制 MS5194T 的配置寄存器。软件流程如图 6 所示。

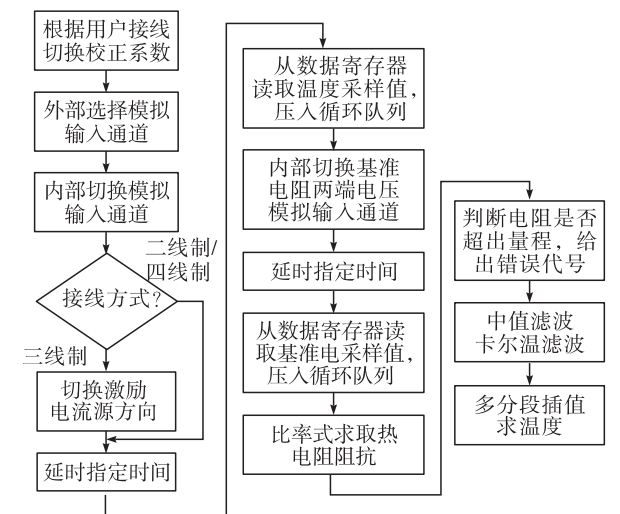


图 6 测温软件流程图

3 试验测试

试验测试设备布置如图 7 所示。用 100 Ω 和 1000 Ω 精密电阻分别代替 PT100 和 PT1000, 把它们放在高低温柜体的外面, 避免 PT100 和 PT1000 在高低温过程中电阻改变太大, 这样可降低评估测

温模块测量电阻精确度的难度。试验中热电阻采用三线接线, 热电阻放在柜体外面, 测温模块放置在高低温柜体内, 先设置高低温柜体在 70 $^{\circ}\text{C}$, 稳定几小时后记录一组, 再设置高低温柜体在 -20 $^{\circ}\text{C}$, 稳定几小时后再记录一组, 用前述方法多次反复试验, 试验结果见表 1。

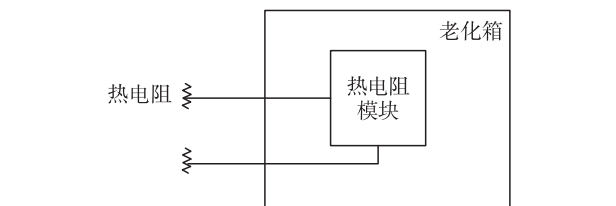


图 7 试验设备布置图

表 1 -20 $^{\circ}\text{C}$ 和 +70 $^{\circ}\text{C}$ 试验 1

精密电阻/ Ω	-20 $^{\circ}\text{C}$	+70 $^{\circ}\text{C}$
100	99.853	98.867
	99.883	98.875
	99.889	98.879
	99.895	98.885
	1009.981	984.521
1000	1009.983	984.523
	1009.988	984.525
	1009.995	984.526

从表 1 中可以看出,测量放在高低温柜体外面的精密电阻值变动太大,究其原因一是 MS5194T 激励电流的温漂系数较大,导致模块测量出来的电阻值误差较大;二是测量 VIN 电压值是以 REFIN 为参考电压的,在实际测量过程中不断切换硬件通道,同时切换 MS51894T 内部通道,导致在实际高低温度试验中,测量出的热电阻值变动比较大。

该文提出在激励电流交换通道方法的基础上,同时把 REF 两端接至 AIN4 + 和 AIN4 -, 采集 VIN 通道和 REF 基准电阻的电压基准为同一基准,均为芯片内部参考电压,在整个测量过程中保持不变。在同样的高低温试验中,试验结果见表 2。

表 2 -20 $^{\circ}\text{C}$ 和 +70 $^{\circ}\text{C}$ 试验 2

精密电阻/ Ω	-20 $^{\circ}\text{C}$	+70 $^{\circ}\text{C}$
100	99.989	99.993
	99.992	99.994
	99.995	99.997
	99.997	99.999
	999.725	999.741
1000	999.733	999.810
	999.774	999.837
	999.831	999.859

从表 2 中可以看出,采用同一基准为参考电压,同时结合激励电流交换通道的方法可以大大减少电阻测量值的误差。

4 结语

该文设计了一种基于全国产芯片的热电阻测温模块,采用 32 位 M4 内核的 N32G452 为处理器和 MS5194T 为模数转换器,实现了从电阻电容到 CPU 等所有电子元器件的国产替代。采用轮询 8 个通道获取测量值,以稳定的芯片内部参考电压为测量通道的参考电压,极大地降低温度给模块带来的误差,提出了新的测量方法降低了常用的三线接法在使用中的误差。全国产化的硬件设计保证了热电阻测温模块芯片和器件的安全性,为其他模块的国产替代设计提供了思路。

参考文献:

- [1] 吕阳,刘莉娜,郑良广,等. 高精度铂电阻温度采集系统设计与实现[J]. 传感技术学报, 2020, 33(05): 774 - 778.
- [2] 姜帅,杨威,胡俊宏,等. 热电偶时间常数测量分拣系统研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(03): 30 - 34.
- [3] 张旺东,姚金城,汤新强,等. 基于热敏电阻器的双 ADC 高精度温度采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(09): 43 - 47 + 53.
- [4] 张华竹,郑会荣,张鸣影. 基于 PLC - RS485 总线的 MODBUS 通信方式在温度采集系统中的应用[J]. 工程与试验, 2023, 63(01): 50 - 51.
- [5] 曾卫东,于景龙,王介昌,等. 国产风电机组主控系统开发与应用[J]. 热力发电, 2022, 51(12): 1 - 9.
- [6] 胡波,陈俊,杨柳,等. 全国产分散控制系统开发与应用[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 159 - 165.
- [7] 刘建丽,李先军. 基于非对称竞争的“卡脖子”产品技术突围与国产替代——以集成电路产业为例[J]. 中国人民大学学报, 2023, 37(03): 42 - 55.
- [8] 张公平. NJ400 系列 PLC 在锅炉控制系统中的应用[J]. 电工技术, 2022(04): 1 - 3.
- [9] 卢佳佳,张亚芳. 基于 STM32 单片机的温度智能测量系统设计与实现[J]. 景德镇学院学报, 2022, 37(06): 53 - 57.
- [10] 郑小彪,姚振东. AD7794 在高精度低功耗测量装置中的应用[J]. 微计算机信息, 2009, 25(08): 307 - 308 + 294.
- [11] 周晓倩,马孝义,陈磊,等. 基于 AD7794 的温室 CO₂ 浓度采集器[J]. 农机化研究, 2014, 36(12): 224 - 226.
- [12] 何伟俊,武素莲,袁嫣红. 基于国产 MCU 的直流塑壳断路器控制系统设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(9): 186 - 190.
- [13] 顾吉林,刘森,耿杨,等. 基于 PT100 的高精度温度测量电路的设计[J]. 测控技术, 2018, 37(05): 101 - 103.
- [14] 霍钰,王功. 基于铂热电阻的高温检测系统设计与优化[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(04): 108 - 110.
- [15] 张梅珠,熊伟,郑喆,等. 铂电阻 Pt100 的温度测量方法[J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 34(03): 52 - 54.

(上接第 24 页)

4 结束语

该装置实验运行结果表明:能依据设定的要求自动去除压缩空气中的粉尘和水等杂质,能及时的掌握能及时掌握风源系统压缩空气处理后的状态指标。当检测的空气指标低于设定值,则表示压缩空气质量合格;当检测的指标高于设定值,则报警器发出报警信号,提示司乘人员进行相应的排查处理,实现了状态修,避免了计划维修的盲目性,提升了风源系统的有效运行效率,减少了维修成本,提高了重载机车的信息化水平,为重载机车的平安运营提供了有力的保障。

参考文献:

- [1] 刘治国. 机车用智能化风源系统技术[J]. 研究大连交通大学学报, 2021(42): 41 - 45.
- [2] 孔德帅. 复杂环境条件下风源系统性能的研究[J]. 铁道机车车辆, 2022(01): 46 - 50.
- [3] 王磊. 内燃机车风源净化系统故障原因分析及处理[J]. 科技创新与生产力, 2019(05): 130 - 132.
- [4] 李景州. GCY520 内燃车制动风源系统故障分析及处理[J]. 科技创新与生产力, 2021(07): 73 - 75.
- [5] 项宇航,丛培鹏. 城轨列车风源系统故障的自动检测方案[J]. 铁电机车车辆, 2019(1): 46 - 50.
- [6] 曹记胜. HXD1 机车风源系统自动除水除油装置的研究[J]. 铁道机车车辆, 2021(04): 87 - 89.
- [7] 杨伟君,李邦国. 和谐号动车组风源系统及其管理[J]. 铁道机车车辆, 2021(05): 55 - 60.