

基于薄膜热电阻传感器的多通道采集 系统设计及性能分析*

刘申楷 樊 涯 李 喆 刘 勇 李星亮

(北京航空精密机械研究所精密制造技术航空科技重点实验室 北京 100076)

摘 要: 机械设备关键部件的运行安全和健康状况与温度状态密切相关。针对传统单点测温方案难以捕捉动态热流场的局限性,提出了一种基于薄膜热电阻传感器的多通道采集系统。所提系统旨在克服现有多路采集时模拟开关的导通电阻及线材阻抗对精度制约的固有缺陷。创新性地采用三线制结合双模拟开关差分补偿架构,辅以双恒流源结构,有效消除线材阻抗和模拟开关导通电阻的影响。此外,利用多项式拟合算法进行实时软件补偿,进一步消除电阻残留偏差。实验验证表明,该系统在 $20^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 温区内测试薄膜热电阻传感器的分辨率达 0.07°C ,精度优于 0.4°C ,能够为关键部件结构健康监测系统提供高可靠性的温度场数据,提升机械部件结构状态诊断的准确性。

关键词: 结构健康监测;温度信号;测温电路;多通道采集;差分补偿

中图分类号: TN76 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Design and performance analysis of multi-channel acquisition system based on thin-film thermoresistive sensors

Liu Shenkai Fan Ya Li Zhe Liu Yong Li Xingliang

(Key Laboratory of Aeronautical Science and Technology for Precision Manufacturing Technology,
Beijing Institute of Aeronautical Precision Machinery, Beijing 100076, China)

Abstract: The operational safety and health of key components of mechanical equipment are closely related to the temperature status. Aiming at the limitations of traditional single-point temperature measurement schemes that are difficult to capture the dynamic heat flow field, this paper proposes a multi-channel acquisition system based on thin-film resistance temperature detectors (RTD) sensors. The system aims to overcome the inherent defects of the on-resistance of the analog switch and the wire impedance on the accuracy constraints in the existing multi-channel acquisition. Innovatively, a three-wire system combined with a dual analog switch differential compensation architecture is complemented by a dual constant current source structure to effectively eliminate the effects of wire impedance and analog switch on-resistance. In addition, the polynomial fitting algorithm is utilized for real-time software compensation to further eliminate the resistance residual deviation. The experimental validation shows that the system can test the thin-film RTD sensors within the temperature zone of $20^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ with a resolution of 0.07°C and an accuracy of better than 0.4°C , which is capable of providing highly reliable temperature field data for the structural health monitoring system of the key components, and improving the accuracy of the structural condition diagnosis of the mechanical components.

Keywords: structural health monitoring; temperature signals; temperature measurement circuits; multichannel acquisition; differential compensation

0 引 言

高端装备制造及测试直接关系到国家战略安全和科技

竞争力。随着故障预测与健康管理系统(PHM)在航空领域的重大突破,多传感器网络实时监控技术逐渐凸显其重要性。文献[1-7]提出,温度作为表征机械部件健康状态的

关键参数,其监测精度直接影响系统的可靠性;在飞机关键旋转部件领域(如发动机轴承、作动电机、齿轮箱等),这些部件长期处于高速旋转、重载、极端温差环境中,温度监测的可靠性挑战尤为严峻。因此,发展高集成、高精度、高可靠的多路温度监测技术,不仅是提升飞机安全性的技术需求,更是实现航空强国战略的国家需求。

文献[8-11]提出,飞机关键部件的温度监测受限于成本和空间约束,难以在轴承、电机等紧凑部件上部署传感器。同时,由于航空环境中的强磁等恶劣工况,传统的单路温度传感校准方式难以消除共模干扰引起的系统误差,单一温度信号难以满足健康监测所需的多参数协同融合。因此,构建基于部件表面的多路温度感知系统具有重要意义。此外,薄膜温度传感器易受外界干扰,且同类传感器个体差异显著,亟需开发一种能够同时采集多路信号并确保信号精度和可靠性的硬件电路。

目前,多路温度信号采集方案中,尤其是采用热电阻作为传感器的测温系统,电阻的微小偏差会对系统整体精度产生显著影响。针对非标准热电阻传感器,例如薄膜热电阻,由于其制备工艺复杂且需采用特制接线方式,在同一温度条件下,其电阻值与标准热电阻(如 PT100)存在差异。此外,长距离测量需求导致使用较长线材,进而增加线材阻抗;多通道测量需求则需使用复用开关,其通道电阻同样会对测量精度造成影响。Geng 等^[12]构建了一个基于低温冷却器的自动板温测量系统,用来确定薄膜电阻率与温度的关系;Cui 等^[13]为了获取在超精密切削过程中的在线瞬态切削温度,开发了能自动校准薄膜热电偶的测温系统,实现校准过程的自动化和智能化;Zhu 等^[14]为了在温度变化的环境中实现精确的温度测量,设计并开发了一套用于瞬态温度测量的薄膜热电偶测试系统。

综上,现有技术普遍采用标准传感器构建测量系统,但较少涉及基于薄膜热电阻传感器的信号采集方案,且较少针对电阻偏差对非标准传感器的精度影响进行优化。本研究提出将双模拟开关集成于标准三线制铂电阻测温电路中,使模拟开关的导通电阻等效纳入线路阻抗范畴,利用三线制固有的差分测量机制,实现对传输线路等效阻抗的主动补偿。同时,通过恒流电路设定高精度电流激励,并配合软件补偿算法,补偿非标准热电阻传感器的阻值偏差。随后,采用温度信号测试系统对薄膜热电阻传感器进行测试分析,验证了多路温度信号采集电路的精度和可靠性,为飞机健康管理系统采集多路温度信号提供了一种创新的实现方法。

1 工作原理

采用“多路热电阻+多路复用模拟开关+恒流电路+微控制器(MCU)”的核心架构开展电路设计。针对热电阻 PT100,将其一端引线连接至 5 V 电压源,另一端引线接入单刀多掷型模拟开关的输入通道。与之对应,把固定阻值

为 $100\ \Omega$ 的零温漂参考电阻的一端引线连接到 5 V 电压源,另一端引线接入同型号模拟开关的相应输入通道。两个模拟开关的公共输出端与两个相同的恒流源电路相连。基于此架构,在热电阻信号传入微控制器之前,其两侧传输回路的阻抗在理论上完全对称,通过对两路差分信号进行处理,能够有效消除共模干扰。随后,信号经过放大和滤波处理后,输入微控制器,进而实现温度值的实时计算与处理。如图 1 所示,展示了该多路温度信号采集系统的原理框图。

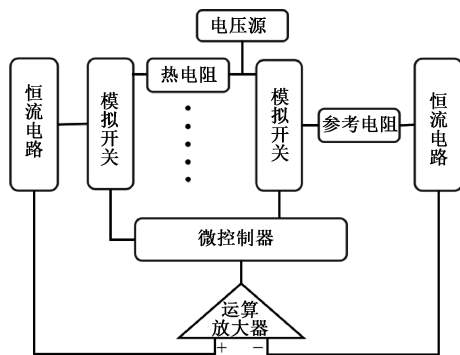


图 1 工作原理框

Fig. 1 Working principle block

2 硬件电路设计

2.1 三线制结构

由于环境干扰和空间尺寸的限制,测量现场往往会出现测量点与信号接入端距离较远的情况。文献[15]提出,针对此类情况,必须使用较长的传输线材,这就不可避免地需要考虑线材阻抗对测量系统的影响。三线制结构在硬件层面通过差分方式,将导线电阻在采集前端进行补偿,其补偿原理如图 2 所示。

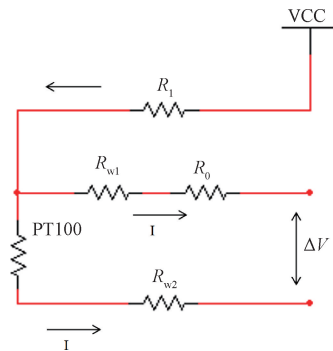


图 2 三线制原理

Fig. 2 Three-wire schematic

图 2 中,VCC 表示电压源, ΔV 代表差分电压, R_1 是保护电阻, R_0 作为参考电阻,用于实现零点校准,而 R_{w1} 和 R_{w2} 则分别代表导线电阻。在三线制电路中,必须确保这两根导线的电阻值完全相等,并严格控制这两路电流保持恒定,以便有效消除导线电阻对电路的影响。其消除原理

由式(1)~(3)所示。

$$\Delta V = I \times (R_{PT100} + R_{w1}) - I \times (R_0 + R_{w2}) \quad (1)$$

$$R_{w1} = R_{w2} \quad (2)$$

$$\Delta V = I \times (R_{PT100} - R_0) \quad (3)$$

从上述公式可知,导线电阻已被有效消除,因此最终输出的差分电压不再受导线电阻的影响。

2.2 双模拟开关结构

图3是由MCU控制的双模拟开关电路结构示意图。其中模拟开关采用单刀八掷(SP8T)设计,即具备一个公共端(COM),并对应8个独立的通道(CH1~CH8)。该电路能够实现多路温度信号的同步采集,并在硬件层面补偿导通电阻。如图3所示,A端和B端接入PT100的同一端,而C端则连接PT100的另一端。具体连接方式为:PT100的A端通过保护电阻 R_1 连接至5V电压源;B端接入模拟开关 U_2 的 R_{1-} 通道,C端接入模拟开关 U_1 的 R_{1+} 通道。两个模拟开关的公共端分别连接至独立的恒流源:COM1端连接恒流电路1,COM2端则串联参考电阻 R_0 后连接至恒流电路2。该架构通过双路对称信号采集路径,确保后续的差分放大电路能够有效抑制线路阻抗(R_w)和开关导通电阻(R_{ON})引入的共模误差。

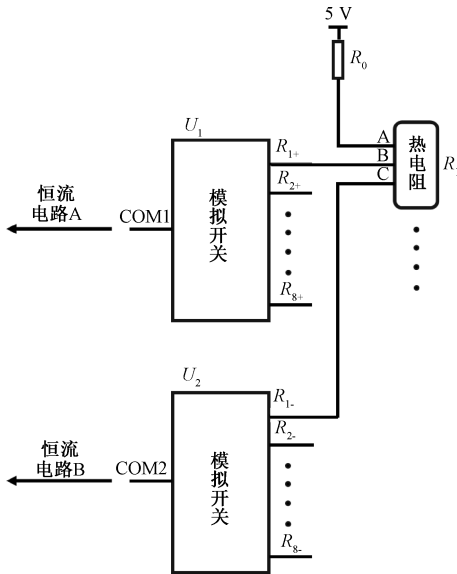


图3 三线制热电阻与双模拟开关的连接框

Fig.3 Wiring block for three-wire RTD with dual analog switches

2.3 恒流源电路

该恒流源电路的核心机制依赖于N沟道增强型场效应管(MOS管)在饱和区(saturation region)的电流恒定性。文献[16]提出,当MOS管处于饱和区工作时,其漏极电流 I_D 主要受栅源电压 V_{GS} 的调控,而对漏源电压 V_{DS} 的变化表现出显著的鲁棒性。为了将N沟道增强型MOS管稳定在饱和工作区,必须同时满足以下两组电压条件,即:

$$V_{GS} > V_{th} \quad (4)$$

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{th} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知, V_{th} 代表MOS管的阈值电压(threshold voltage)。恒流源电路采用双路对称设计,具体电路图如图4所示。其中,运算放大器选用低温漂型,漂移率约为 $0.01 \mu V/^\circ C$,工作电压范围介于 $+1.8 \sim +5.5 V$ 之间。MOS管的阈值电压为 $750 mV$,属于N沟道类型。参考电压 V_{REF} 分别通过运算放大器 U_1 和 U_2 进行电压跟随,以驱动MOS管 Q_1 和 Q_2 的栅极。该栅源电压 V_{GS} 用于确保 Q_1 和 Q_2 工作在饱和区,从而实现漏极的恒流输出。设计要求两路恒流电路的元件规格与参数必须保持一致,且应尽可能选用高精度、低温漂的元器件。

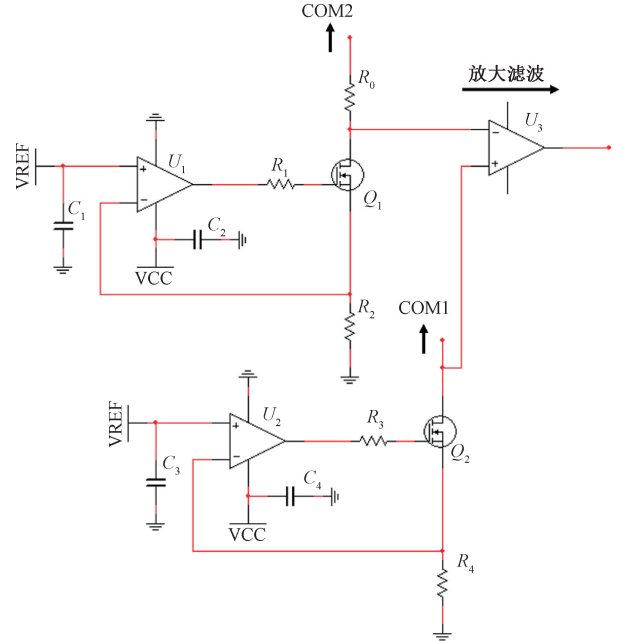


图4 恒流电路连接图

Fig.4 Constant current circuit wiring diagram

差分电压的计算公式如式(6)~(8)所示。

$$U = I_1 \times (R_{PT100} + R_w + R_{ON}) - I_2 \times (R_0 + R_w + R_{ON}) \quad (6)$$

$$I_2 = I_1 = I \quad (7)$$

$$U = I \times (R_{PT100} - R_0) \quad (8)$$

在上述公式中, I_1 表示连接到模拟开关 U_1 的恒流电路1所提供的恒流值,而 I_2 则表示连接到模拟开关 U_2 的恒流电路2所提供的恒流值。当这两组恒流电路配置相同时,它们能够输出等值的电流。 R_{PT100} 代表PT100的电阻值, R_0 为校准零点的电阻, R_w 表示线材的阻抗, R_{ON} 则是模拟开关的导通电阻。通过式(8)的分析可知,线材阻抗和导通电阻均已得到消除,差分电压会随热电阻传感器阻值的变化而相应变化。

2.4 微控制器模块

微控制器在该系统中主要承担两组模拟开关的同步切换控制任务,并处理差分电压以计算温度及进行算法补偿。

所使用的微控制器具体型号为 STM32F103C8T6, 具体的连接方式如图 5 所示。

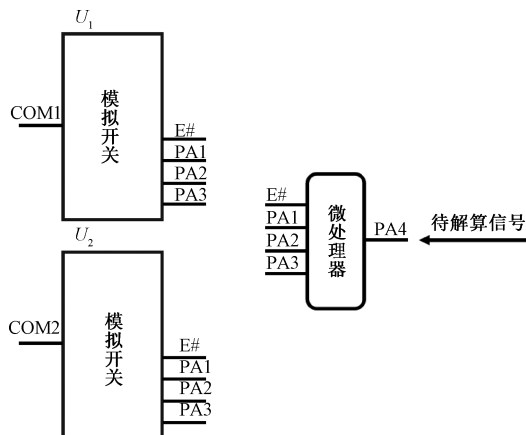


图 5 微处理器连接框图

Fig. 5 Wiring diagram of microprocessor

图 5 中, 两组模拟开关的使能端 E# 以及逻辑控制端 PA1、PA2、PA3 均与微控制器相连。微控制器发出使能信号, 激活模拟开关导通。随后, 3 个逻辑控制端按顺序循环输出 {000、001、010、011、100、101、110、111} 这 8 个三位逻辑电平, 以控制 8 个通道依次循环导通, 从而实现多路温度传感信号的轮询功能。

待解算信号通过 PA4 引脚输入至微处理器, 获取 ADC 原始值。结合采集位数, 计算出模拟电压值。然后, 再结合放大倍数、恒流值及零点校准电阻, 反推出 PT100 当前的阻值。最终, 依据 PT100 的温升二次曲线, 通过求根公式即可反演出当前温度。计算过程如式 (9)~(10) 所示。

$$V_D = \frac{V_{REF} \times (n_{adc} \div 2^N)}{K} \quad (9)$$

$$R_{PT100} = \frac{V_D}{I} + R_0 \quad (10)$$

式中: V_D 表示原始差分电压, n_{adc} 代表 ADC 采集值, V_{REF} 和 N 分别对应该型号微控制器的参考电压和分辨率, K 为放大倍数。在计算分辨率时, 可参考式 (11)~(14)。其中, 参考电压 V_{REF} 设定为 3.3 V, ADC 位数 N 为 12 位。考虑到恒流值对传感器的自热效应及整体系统测量精度的影响, 恒流值过大将引发传感器的自热误差, 而恒流值过小则易受外界干扰。经过权衡, 恒流值 I 被设定为 0.926 mA。为使满量程输出与 ADC 的满幅输入范围相匹配, 放大倍数 K 确定为 31 倍。S 代表 PT100 的灵敏度, 其数值为 0.385 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。

$$\Delta V_{ADC} = \frac{V_{REF}}{2^N} \quad (11)$$

$$\Delta V_{in} = \frac{\Delta V_{ADC}}{K} \quad (12)$$

$$\Delta R = \frac{\Delta V_{in}}{I} \quad (13)$$

$$T_{RES} = \frac{\Delta R}{S} \quad (14)$$

依据式 (11)~(14) 依次展开计算, 最终确定温度分辨率 $T_{RES} \approx 0.07^{\circ}\text{C}$ 。

3 软件补偿与标定

电路元器件的实际值与标称参数存在偏差, 此外, 对称补偿所用的两个模拟开关各通道的导通电阻也不完全一致, 这将导致偏差电阻残留。在硬件结构上进行补偿的基础上, 进一步通过软件补偿, 可以更有效地提升测温精度。

3.1 软件补偿的理论方法

在多通道温度采集系统中, 测温误差不仅源于传感器本身的非线性特性, 还受到模拟开关导通电阻不一致、放大电路温漂、ADC 量化偏差以及恒流源波动等多种因素的影响。这些综合误差在宽温区 ($20^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$) 呈现出明显的非线性趋势, 无法通过简单的线性补偿有效消除。采用二次多项式拟合能够更准确地描述误差随温度变化的趋势, 显著提升补偿精度。因此, 理论方法采用了基于二次多项式拟合的多通道温度补偿算法。

通过实验, 本研究获得了覆盖 $20^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 、以 10°C 为步长的多个温度标定点下的 8 个通道测量数据, 并建立了各通道的温度误差模型。针对每个通道, 独立进行了最小二乘法的二次多项式拟合, 生成了相应的系数数组, 以便嵌入式系统直接调用进行采集过程中的实时补偿。该方法能有效实现对多通道温度测量系统非线性偏差的软件补偿。

3.2 试验补偿过程及方法

补偿过程通过将接入电路的三线制 PT100 标准传感器置于恒温箱内, 并使用 Fluke 5650-25C 热电偶配合 Fluke 1529 温度信号采集仪进行温度梯度的标定。在测试过程中, 需确保热电偶的测温头尽可能靠近 PT100 标准传感器, 以避免两者测量的温度出现较大偏差。温度信号采集平台的具体示意图如图 6 所示。



图 6 温度补偿实验平台

Fig. 6 Temperature compensation experimental platform

记录连接至 PT100 标准传感器的信号采集系统的 8 路温度信号与 Fluke1529 显示的标准温度信号之间的差

值,随后进行二次多项式拟合。每一路温度采集的最终结果为测量值加上通过拟合二次曲线实时计算的差值。具体公式如式(15)、(16)所示。

$$T_{corrected} = T_{measured} + \Delta T \tag{15}$$

$$\Delta T = f(T_{measured}) \tag{16}$$

其中, $T_{corrected}$ 表示补偿后的温度值, $T_{measured}$ 代表测量的温度值, ΔT 则由补偿曲线拟合出的差值。

经过 10 次测量以验证其重复性后,记录相关数据并生成补偿曲线。如图 7 所示,8 路测温通道的补偿曲线中,Z 轴代表测量误差,X 轴表示通道号,Y 轴对应理论温度。由图 7 可知,8 路温度信号的补偿值随理论温度的升高而增大,且各通道的补偿值存在差异,特别是通道 2 和 7 的信号补偿值相对更高。其根本原因在于这两组模拟开关的通道电阻差异较大,导致差分后的剩余导通阻抗较大。此外,受电路放大倍数取值及二次温升曲线函数关系式的影响,各通道计算出的补偿值会随理论温度的升高而逐渐增大。

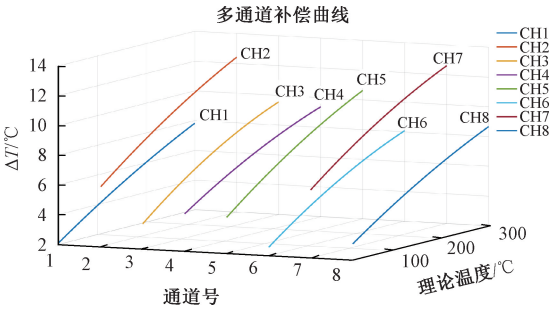
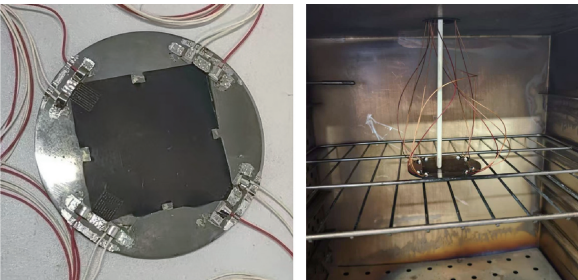


图 7 差值拟合曲线
Fig. 7 Difference fitting curve

3.3 薄膜热电阻传感器标定

薄膜热电阻传感器的结构如图 8(a)所示,需通过标定实验拟合出温度-阻值曲线。在标定过程中,务必确保 Fluke 5650-25C 热电偶的测温头紧密贴合于平面样件上的薄膜热电阻传感器附近,具体位置如图 8(b)所示。标定过程以 10℃ 为步长,覆盖 20℃~300℃ 的温度范围。



(a) 薄膜热电阻传感器样件
(a) Thin-film thermoresistive sensor flat sample
(b) 恒温箱标定
(b) Calibration in a constant temperature chamber

图 8 薄膜热电阻标定实验

Fig. 8 Calibration experiment for thin-film thermistors

获取薄膜热电阻传感器的二次多项式拟合系数(参考 $T = a \times R^2 + b \times R + c$),具体数据如表 1 所示。

表 1 拟合系数
Table 1 Fitting coefficient

通道号	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
CH1	0.000 134	0.336 719	100.133 623
CH2	0.000 140	0.333 868	100.576 774
CH3	0.000 176	0.331 133	101.116 258
CH4	0.000 127	0.337 381	100.271 196
CH5	0.000 155	0.332 997	100.443 726
CH6	0.000 167	0.349 527	100.122 579
CH7	0.000 148	0.336 245	100.552 437
CH8	0.000 139	0.329 687	101.023 981

显然,由于薄膜热电阻传感器的制备工艺较为复杂,且需采用特定的接线方式,导致其系数难以保持一致性。因此,在使用前,必须对每个传感器逐一进行标定。随后,通过硬件与软件的协同补偿,进一步提升温度采集系统的精度。

4 试验验证

4.1 静态精度测试

将薄膜热电阻传感器连接至采集系统进行实验验证。实验平台选用恒温箱,并采用 Fluke 5650-25C 热电偶配合 Fluke 1529 温度信号采集仪进行温度值的标定。设定起始测试温度为 25℃,温度步长为 10℃,直至 295℃ 终止,确保各测试温度点均位于软件补偿温度区间的中点,以增强测试验证的可信度。系统在每个温度梯度点采集相应温度并进行比对,计算误差并取其绝对值,最终拟合生成误差曲线,具体结果如图 9 所示。

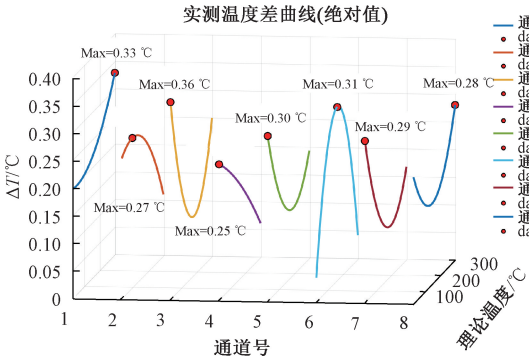


图 9 软件补偿结果
Fig. 9 Software compensation results

图 9 中,Z 轴代表测量误差的绝对值,X 轴表示通道号,Y 轴则对应理论温度。可以看出,8 个通道在 20℃~300℃ 的误差变化趋势各不相同,这表明各通道的补偿效果存在差异。此外,所有通道的最大误差值均未超过 0.4℃,这一数值即为该温度信号采集系统的精度值。

4.2 动态性能测试

在三线制薄膜热电阻多通道采集系统中,传感器阻值

的精确测量依赖于稳定的恒流激励源。当模拟开关进行通道切换时,恒流源需要经历一个动态建立过程。该过程会受到 MOS 管栅极电容充放电、运放响应以及线路寄生参数的影响,之后才能恢复稳定的输出电流。

若在电流尚未稳定时开启 A/D 转换,将会致使采样电压偏低,进而造成电阻计算出现偏差,温度测量产生负误差。因此,需在程序中设置合理的软件延时,以保障恒流源输出稳定,同时不会明显降低多通道采集的动态响应速度。基于此,开展以下实验。

把 Fluke 万用表接入恒流电路,将通道切换延时由 100 ms 以 1 ms 为步进逐步缩短至 10 ms。在每个时间点采集 10 次电流值并求取平均值,绘制的数据图如图 10 所示。

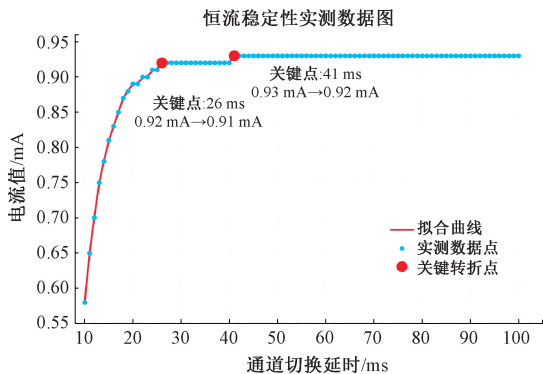


图 10 恒流稳定性实测数据

Fig. 10 Constant current stability test data

从图 10 能够看出,当通道切换延时从 100 ms 逐步缩短至 41 ms 时,恒流源的电流值较为稳定,约为 0.93 mA。从 41~26 ms 左右,恒流值下降至约 0.92 mA。在 26~10 ms 期间,随着通道切换延时进一步缩短,通道切换速度持续加快,恒流源的电流值急剧降低。

同时,从图 10 中的曲线走势可以看出,通道切换延迟适宜选择在 41~100 ms 的区间内,因此选择 50 ms。这一数值比恒流值变化节点的 41 ms 稍慢,但可确保在通道切换延迟稍有偏差时,电流保持足够稳定。

接着对比验证通道切换延时设置为 50 ms 和通道切换延时设置为 10 ms 的两组采集系统对温度精度的影响。

实验平台选用恒温箱,采用 Fluke 5650-25C 热电偶搭配 Fluke 1529 温度信号采集仪进行温度值的标定。实验时,将置于同一恒温箱内的两组薄膜热电阻传感器分别连接至两组采集系统进行实验验证。恒温箱从 20℃ 升温至 300℃,步长设定为 10℃,记录两组采集系统的温度数据,如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,与通道切换延时为 50 ms 时采集的数据相比,10 ms 的通道切换延时会使恒流源无法输出预先设定的稳定电流。随着温度升高,温度测量的误差不断增大,从而无法获取可靠的温度数据。

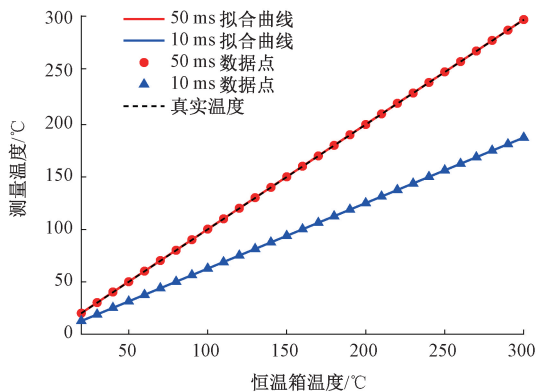


图 11 对比验证数据

Fig. 11 Comparison verification data

5 结 论

根据上述研究与讨论,得出以下结论:

此信号采集系统适用于薄膜热电阻传感器的多通道温度信号采集,其测温精度高于 0.4℃,分辨率可达 0.07℃。当通道切换延时设置为 50 ms 时,该系统能够在具备较快动态响应能力的同时,维持恒流稳定性。

采用三线制双模拟开关结构的电路设计,有效解决了线材阻抗和导通阻抗对热电阻测量精度的影响。

基于硬件补偿架构,并结合多项式拟合算法,进一步消除了两组模拟开关之间对应通道导电阻的偏差问题。

尽管系统成功消除了残留电阻对热电阻传感器精度的干扰,但其动态性能依旧受到模拟开关串行切换所导致的时间延迟的限制。然而,对于像温度这种缓变信号,该系统已能够满足使用要求。未来,通过深入探究并优化并行采集架构,能够进一步增强系统的动态跟随能力与实时性。

参考文献

- [1] 江佩瑶,王洪亮,吴兴华,等.基于数据增强与IEVO-GRNN的飞机引气系统故障诊断[J].电子测量技术,2025,48(10):42-50.
JIANG P Y, WANG H L, WU X H, et al. Fault diagnosis of aircraft bleed air systems based on data augmentation and IEVO-GRNN [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(10): 42-50.
- [2] 王成刚,张大为,李建海.基于自适应遗传优化神经网络的航空装备故障诊断[J].电子测量技术,2024,47(7):192-196.
WANG CH G, ZHANG D W, LI J H. Fault diagnosis of aviation equipment based on adaptive genetic optimization neural network [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(7): 192-196.
- [3] 张昊,王海茹,马继东.基于数据增强的可解释旋转机械故障诊断[J].电子测量技术,2025,48(8):105-115.

- ZHANG H, WANG H R, MA J D. Interpretable rotating machinery fault diagnosis based on data enhancement[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(8): 105-115.
- [4] 营笑, 褚国安, 刘砚涛, 等. 引入去噪因子的薄板结构 SH 波损伤成像研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(8): 297-306.
- YING X, CHU G AN, LIU Y T, et al. Research on damage imaging based on SH wave in thin-plate structures with denoising factor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45 (8): 297-306.
- [5] GINZARLY R, MOUBAYED N, HOBLOS G, et al. Assessing HMM and SVM for condition-based monitoring and fault detection in HEV electrical machines[J]. *Energies*, 2025, 18(13): 3513.
- [6] WANG ZH H, SHI H, DONG Z SH, et al. Refined frequency monitoring based on characteristic excitation with application to early fault diagnosis of thin plate damage[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 228(1): 112432.
- [7] 李天放, 孙一宸, 于明鑫, 等. 结合语义分割与跨模态差分特征补偿的红外与可见光图像融合方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(7): 34-45.
- LI T F, SUN Y CH, YU M X, et al. Infrared and visible image fusion method integrating semantic segmentation and cross-modality differential feature compensation[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(7): 34-45.
- [8] SONMEZOCAK T. Intelligent UAV health monitoring: Detecting propeller and structural faults with MEMS-based vibration[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2025, 69: 102130.
- [9] DENG K L, OMPUSUNGGU A P, XU Y G, et al. A review of material-related mechanical failures and load monitoring-based structural health monitoring (SHM) technologies in aircraft landing gear[J]. *Aerospace*, 2025, 12(3): 266.
- [10] CHEN G L, LI J, ZHOU F L, et al. General strategies for multi-parameter fusion detection in developing sensors: Potential method towards interference and selectivity[J]. *Materials & Design*, 2025, 254: 114143.
- [11] YAO Q T, BING H K, ZHU G P, et al. A novel stochastic process diffusion model for wind turbines condition monitoring and fault identification with multi-parameter information fusion [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 214: 111397.
- [12] GENG ZH, HAN Y M, ZHOU ZH R, et al. Design of electrical sheet resistance of thin film measurement system based on GM cryocooler in cryogenic temperature[J]. *Key Engineering Materials*, 2024, 977: 63-68.
- [13] CUI Y X, QI Y, GUO L M, et al. The design of automatic system for the calibration of testing temperature cutter with thin film thermocouple [J]. *Materials Science Forum*, 2016, 3901 (836-837): 552-561.
- [14] ZHU X, AN W Q, LIU CH, et al. Development of thin film thermocouple test system for transient temperature measurement[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 799(1): 012004.
- [15] MIYAMOTO K, HAYASHI K, SAKAMOTO A, et al. A high-Q resonance-mode measurement of EIS capacitive sensor by elimination of series resistance[J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2017, 248: 1006-1010.
- [16] SIKHAMANI T, PANDA D K, RAUT P. Performance analysis of nanoscale organic field-effect transistors with respect to different device parameters[J]. *Microsystem Technologies*, 2025, 31: 3495-3505.

作者简介

刘申楷, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为结构健康感知技术。

E-mail: shenkailume@163.com

李星亮(通信作者), 硕士研究生导师, 高级工程师, 主要研究方向为结构健康感知技术。

E-mail: lixing3758@126.com