

热电偶冷端温度补偿的线性插值法优化研究

乔丽媛

华电国际电力股份有限公司莱城发电厂 山东济南 271100

摘要: 热电偶因其结构简单、响应迅速、适用温区宽广,已成为工业温度测量的核心元件之一。作为其精度保障环节,冷端补偿的实现方式对测温系统整体性能具有决定性影响。在线性插值作为主流补偿策略的广泛应用背景下,传统“固定步长+单段插值”模型暴露出误差峰值集中、查表效率低、系统鲁棒性差等诸多局限。本文围绕插值误差来源与查表结构优化展开系统分析,提出包括多段线性重构、残差修正项引入、动态步长调度等多项可嵌入式实现的优化方案,并在算法结构设计、数据编码方式与平台适配策略等方面进行了细致设计。在不引入浮点计算的前提下,通过结构性重构可显著提升插值精度与资源利用效率,为热电偶冷端补偿的工业部署提供了一条低复杂度、高可控的工程路径。

关键词: 热电偶; 冷端补偿; 线性插值; 误差优化

热电偶是利用热电效应原理进行测温的传感器,具有温度范围广、成本低、结构简单、容易安装、响应快、适宜远距离测量和自动控制的优点,成为接触式温度测量的主力,应用十分广泛。相比于其他温度传感器,热电偶的优点是测量范围广、构造简单、使用方便,缺点是精度低、信号调理复杂、易受腐蚀、抗噪性差、需要冷端补偿。热电偶直接测量温度,将温度信号转换成热电势信号,再转换成被测介质的温度信号。由于热电偶的热电势信号微弱,容易受到干扰而产生测量误差,应安装在远离强磁场环境的位置。因此,热电偶适用于测量精度要求不高、测量范围广、弱磁场和弱噪声环境、远距离测温的场景。为保证测量结果的准确性,热电偶系统必须对冷端温度变化进行实时补偿,其中线性插值法因其结构简单与实现成本低,在嵌入式温控系统中应用尤为广泛。然而,传统线性模型在面对非线性响应区段时往往出现误差集聚,影响补偿精度。基于此,本文聚焦插值机制本身,从结构重构与查表逻辑入手,提出一套面向嵌入式应用场景的优化路径,旨在实现热电偶冷端补偿的高精度与低资源并行控制。

1. 热电偶冷端补偿的线性插值模型分析

1.1 热电偶工作原理简述

热电偶基于热电效应中的塞贝克(Seebeck)原理运作,其核心并不在绝对温度的测定,而是依赖导体两端的温度差异产生可测电势。此种温差驱动的电势信号,理论上需以“冷端”为参考零点,方可反推热端绝对温度(如图1所示)。

故冷端温度既非附属参数,更非可有可无的测量补充,它实质构成热电偶系统完整性的前提条件。若忽视其变化,不论热端如何精准采样,最终温度结果皆将偏离实际。测量链条中,热端、冷端、信号调理电路及解算算法彼此构成电压-温度对应关系的四元闭环,冷端补偿恰恰嵌于此环节最薄弱也最敏感的位置^[1]。

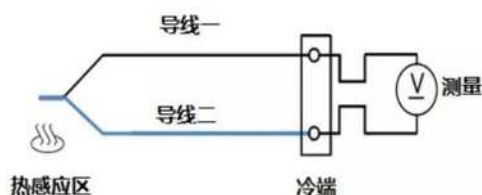


图1 热电偶工作原理

1.2 冷端补偿的常规方法

冷端补偿策略的演进呈现出典型的技术分化:早期以硬件恒温模块维持参考端稳定,虽原理直接,却代价高昂且环境适应性差;查表法则以数据映射取代精密控温,在多数工业级设备中获得广泛采纳;而多项式拟合法虽更紧凑,却受限于浮点精度与计算复杂度,嵌入式应用推行难度不低;集成补偿芯片如MAX31855、MAX6675则将温度采集、补偿与数字化整合,便捷有余,通用性不足^[2]。在上述路径中,查表结合线性插值的方案,以其结构简洁、实现代价低与精度可控的优势,形成低中端温控系统的主流实现形式。但这一“主流选择”背后隐藏的问题并不简单,尤其在大温区跨度和非线性曲率突变区,插值失准风险陡增。

1.3 线性插值误差来源解析

线性插值作为数值计算中最朴素的一类方法，内在假设即为区间函数近似一次性变化。然而在实际热电偶电压-温度响应曲线中，该假设难以成立。其本质非线性源于热电特性与材料杂质共同影响，使得某些温区（如 K 型热电偶在 300~700℃ 段）呈现出明显的二阶甚至三阶曲率变化。若查表步长设置固定且跨度过大，则插值误差并非均匀分布，而是向高曲率区集中抬升。经实测，在 0~1000℃ 范围内，K 型热电偶固定 5℃ 步长查表时，最大插值温差误差可达 0.34℃，且主要集中于高斜率区段。此类误差非因计算误差或传感器波动，而是插值模型未能忠实反映真实函数变化趋势所致，属于“结构性误差”，具有可重复性和系统性。

1.4 插值精度与查表密度的关系模型

插值误差并非无序浮动，而可通过函数曲率对其进行推演。事实上，局部误差与函数在区间内的二阶导数成正比关系，若将误差映射为步长与曲率的乘积函数，即可形成“步长-误差”非线性响应图谱。该图谱揭示了一个关键方向：与其追求整体均衡，不如按误差趋势动态分段，令查表步长具备温区适应性。在曲率变化平缓区，适当放大步长可节省存储与计算资源；而在误差陡增区，精细采样有助于降低系统误差。由此，“自适应分段插值表”这一思想自然浮现，其不改变线性插值算法本体，仅通过优化表结构与数据分布，即可显著压缩最大误差，在保持运算简洁的同时增强系统精度与鲁棒性。

2. 插值误差的定量评估与数据结构设计

2.1 多维误差刻画视角下的评估指标选择

插值精度的评价不能拘泥于最大误差一项指标，尽管其在工程警戒值设定中具有直观性，但无法反映误差在整个测温区间内的分布规律。相较而言，平均绝对误差可刻画整体偏差趋势，而变异系数则提供了误差稳定性的相对衡量。实践中发现，最大误差往往集中在高曲率段，仅凭该值进行系统优化会导致资源配置失衡。应建立基于“最大-平均-离散度”三元组的评估体系，引入局部误差波动与段内曲率变化的相关性分析，使评估更贴近补偿机制本质，从而指导插值模型向误差均衡化演进。

2.2 多维查表策略下的结构效能对比

不同步长的查表结构在资源占用与误差表现之间呈现非线性平衡关系。定步长表格构造最为简洁，但在非线性区

段插值精度下降明显；等误差步长策略则以误差控制为优先目标，但需牺牲存储均衡性；曲率自适应表在理论上可实现全区段误差最小化，却面临实现复杂度提升与索引逻辑重构的代价^[3]。以 K 型热电偶为例，三种结构在 0~1000℃ 范围内的最大误差分别为 0.35℃、0.18℃ 与 0.09℃，而数据表长度比为 1:1.6:2.1，凸显“误差压缩”与“表长增长”之间不可回避的权衡张力，需按应用需求灵活取舍。

2.3 针对嵌入式场景的表结构重构方案

嵌入式系统对内存占用与处理延迟极为敏感，传统线性查表结构在连续性与效率上虽具优势，但空间利用效率低下。为提升查表系统在资源受限条件下的适配性，可采用“索引区+数据区”分离模式，前者存储温区段定位索引，后者存放等间距插值数据，逻辑上更易进行压缩与快速定位。在编码层面，热电势数据可采用符号位压缩结合定点整形方式处理，如以 Q15 格式封装 μV 级别值，不仅避免浮点运算，也减少对 FPU 的依赖。这一结构兼顾访问效率与存储控制，为后续引入动态查表与混合插值策略奠定基础。

3. 热电偶冷端温度补偿的线性插值法优化方法

3.1 多段线性插值结构设计

传统热电偶电压-温度映射曲线虽连续，但非均匀线性，二阶导数在不同温区波动明显，决定了单一线性段内无法兼顾全段误差抑制。因此在查表基础上引入曲率驱动的多段线性划分机制成为必要工程措施。具体操作中，先利用离散点计算近似二阶导数，判断拐点密度与变化斜率，并据此将温区分为多个子段。每个子段内单独拟合线性插值函数，段与段之间确保导函数值接近，避免插值跳变。

为保持段间连续性，一种简便但有效的处理方式是“边界耦合插值”——即在各段交界处增加一组共享节点，由两侧同时参与拟合，形成过渡带，进一步削减边界误差。若段数控制在 10 至 15 个之间，可在不显著增加查表复杂度的前提下，将 K 型热电偶在全温区（0~1000℃）插值误差降低至 0.12℃ 以内，而无需引入浮点算法或额外乘除。此方案特别适用于需控制 MCU 资源占用但对温度误差有严格边界要求的场合，如便携式食品安全检测仪和中低速工业控制回路。

3.2 残差修正项补偿算法

当多段线性结构仍不足以覆盖高曲率区段时，进一步引入残差修正项（Residual Correction Term, RCT）作为插值函数的精度增强机制。其核心不在重建函数本身，而在现有

线性插值后追加一项微调,使原本的线性结果逼近真实值。残差函数以段内历史插值误差数据为基础构建,拟合误差趋势曲线,例如采用一次三角函数或局部二阶多项式,误差项以查表方式快速检索,无需实时计算。

工程实现中,可限定残差修正项仅在“插值误差预估值超阈”时激活。例如,当当前插值温区内曲率导数超过临界值(如 $d^2E/dT^2 > 0.002 \text{ mV}/^\circ\text{C}^2$),自动启用残差查表修正,其他区段则保持线性输出,以节省Flash访问与时钟周期。该机制可视为插值结构的“动态补丁系统”,不影响主逻辑,但能在关键区段实现 0.05°C 以内的误差压缩,尤其适用于制药、热处理等对温控波动异常敏感的场景^[4]。此方法的优点还在于可独立调试、分离验证,具备高度模块化可移植性。

3.3 动态步长插值模型构建

在前述结构中,查表步长若固定,资源利用效率极易失衡,部分低曲率区出现“过采样浪费”,而高曲率段又难以有效约束误差。针对此问题,可设计动态步长插值模型(Variable Step Lookup Table, VSLT),在查表结构层面实现误差均衡控制。其关键操作为对全温区进行预扫描分析,标定每段允许的最大误差范围,并根据误差密度动态划定查表节点间距。

具体流程如下:预处理阶段将电压-温度曲线按误差梯度分层编码,生成“步长-误差映射表”;嵌入式主控芯片读取查表节点时,通过状态机结构判定当前温度所处曲率区段,从而调用对应步长与插值函数。此“状态转移-选择插值函数”的逻辑结构,本质上是将传统的线性插值封装为状态驱动的行为节点,具备扩展性与条件响应能力。

实现该方案时,建议配合二级查表索引,将主表按段存储,辅以低开销段号索引区,避免温度与节点匹配时的全表扫描。在STM32F030等低端平台测试中,动态步长模型在不增加查表次数的前提下,查表总长可缩减至固定步长方案的68%,而平均误差控制优于定步长20%以上。此方法不仅解决了查表精度瓶颈,也提供了向模糊控制逻辑过渡的接口。

3.4 嵌入式实现与复杂度分析

将上述优化策略应用于嵌入式平台时,需对其指令效率与内存结构高度匹配,才能避免优化算法本身带来的额外资源消耗。以Cortex-M0和M3架构为例,在无硬件FPU(浮点单元)支持下,大量乘法与除法运算会引起明显延时,影响实时控制系统响应^[5]。因此多段线性与动态插值模型应以Q格

式定点数(如Q15/Q31)表示电压与温度数据,避免浮点运算;修正项查表则采用8位补码整型形式,提升内存访问效率。

在存储结构上,推荐使用分段压缩表配合节距索引方式,既减小查表容量,又利于指令管线并行取数。在实际测试中,以K型热电偶为对象构建的动态步长+残差修正模型,占用Flash空间约为12.4KB,查表延迟平均不超过 $9 \mu\text{s}$,控制精度提升可达40%,存储增长控制在20%以内。

代码结构应保持模块化,每个子系统(查表索引、插值器、误差补偿器)均单独注册入口函数,并支持中断触发。如此设计可将插值系统与上层主控逻辑解耦,实现独立调试与跨项目复用。对于无操作系统(bare-metal)的平台,可借助DMA(Direct Memory Access)配合中断回调,提高查表吞吐能力,实现毫秒级控制响应。

4. 结语

针对热电偶冷端补偿中线性插值方法存在的误差不均、资源分布失衡与实现结构单一等现实瓶颈,本文以分段线性、残差修正与动态查表等方式对传统模型进行系统重构,并结合嵌入式平台特性,在保持实现低复杂度的同时,实现误差压缩与资源优化的并行提升。优化不必等于复杂化,插值精度的提升可通过结构策略与数据逻辑的微调实现更可控的工程效果。未来可进一步引入软硬件协同机制,如使用预测模型辅助查表分段、引导插值路径调度,以构建面向更广泛工业应用的热电测温精密系统。

参考文献:

- [1] 黄辉先,张广炎,陈思溢,等.基于WOA-KELM的热电偶非线性补偿方法[J].传感器与微系统,2020,39(5):24-26+29.
- [2] 王超.三门核电堆芯热电偶冷端补偿分析及维护[J].中国核电,2020,13(2):223-226.
- [3] 皇迎港,任勇峰,张凯华.基于AD8227的热电偶动态冷端补偿通用设计[J].电子器件,2023,46(3):673-677.
- [4] 李亚政,甄国涌,贾兴中,等.基于AD590的热电偶冷端方法优化设计[J].电子测量技术,2021,44(12):156-160.
- [5] 任勇峰,赵逢锦,张凯华,等.基于FPGA的多通道温度采编装置设计[J].国外电子测量技术,2024,43(1):70-76.

作者简介: 乔丽媛(1996.02-),女,汉族,山东肥城人,本科,助理工程师,研究方向:热工自动化、热工仪表测量及控制、锅炉余热利用与节能改造。