

一种基于分段拟合的热电偶测温控制方法

韩昧华¹, 王芳¹, 桑红燕², 杨新泉³

(1.聊城大学 网络信息中心, 山东 聊城 252059; 2.聊城大学 计算机学院, 山东 聊城 252059;
3.菏泽学院 计算机学院, 山东 菏泽 274015)

摘要 热电偶的热电势与温度呈非线性关系,在很大程度上影响了热电偶测量的精度。为了提高热电偶测温控制系统的测量精度,在应用最小二乘法实现热电势和温度特性的线性处理基础之上,通过对不同测温区间的拟合系数的分别优选,提出一种基于分段拟合的热电偶测温控制方法。对该方法进行模拟实验。实验结果表明,该测温控制方法简捷高效,误差可控制在1%之内,可适用于智能仪表和实时控制。

关键词 热电偶; 测量精度; 线性化; 分段拟合

中图分类号 TP368.1

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



A Thermocouple Control Method Based on Piecewise Fitting

HAN Meihua¹, WANG Fang¹, SANG Hongyan², YANG Xinquan³

(1. Network Information Center, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. School of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 3. School of Computer Science, Heze University, Heze 274015, China)

Abstract There is non-linear relation between thermoelectric potential and temperature, which is affecting measurement accuracy of thermocouple. In order to improve the measurement accuracy of the thermocouple temperature control system, application of least square method to realize linear relation between thermoelectric potential and temperature is introduced firstly, then a new thermocouple method based on piecewise fitting is put forward, and the dynamic thermocouple piecewise fitting formula derivation is given in this paper. A simulation experiment is carried out for the method. Experiment results show that the new method is simple and efficiency, error can be controlled within 1%, and this method can be applied to the intelligent instrument and the real-time control systems.

Key words thermocouple; measurement accuracy; linearization; piecewise fitting

1 引言

热电偶是根据热电效应测量温度的传感器,是温度测量仪表中常用的测温元件。将不同材料的导体A和B接成闭合回路,接触端的一端称测量端,则另一端分开,用导线接入显示仪表,被称为参比端。若测量端和参比端的温度 T 和 T_0 不同,则在回路的A、B之间就产生一热电势 $E_{ab}(T, T_0)$,这种现象称为塞贝克

收稿日期:2023-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(62273221);山东省高等学校青创人才引进计划;聊城大学科研项目(318011922)资助

通讯作者:桑红燕,女,汉族,博士,教授,研究方向:智能优化与控制, E-mail: sanghongyan@lccu.edu.cn。

效应,即热电效应^[1]。 $E_{ab}(T, T_0)$ 大小随导体A、B的材料和两端温度 T 和 T_0 而变,这种回路称为原型热电偶。在实际应用中,热电偶的测量端放到被测温度 T 处,而保持参比端的温度 T_0 稳定。显示仪表所测得电势随被测温度 T 变化而变化。一般热电偶具有 $-200 \sim 2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的较大宽度测量范围,因此在各类测试系统中被广泛应用^[2]。

测量的精度是测试中一个关键问题,研究表明,热电偶测量温度时,将温度数据转换成电信号时,存在非线性问题,在一定程度上影响了测温的精度^[3]。如何减少测温误差,提高测量精确度一直是热电偶应用与设计的研究热点。

为了提高基于热电偶的测温控制系统测量精度,国内外众多学者对其进行深入研究,大体上可以归纳为两类主要方法^[4-6],一类是硬件补偿法,在测量电路中再加入补偿电路,使输入与输出实现线性化,但是这类方法需要一定的硬件投资,并且实现起来的电路工艺比较复杂;另一类是以曲线逼近法为典型的线性化补偿法,该类方法在一定程度上可以提高测量精度,但是在测温区间幅度较大时,存在着热电偶输出值与实际温度值存在较大偏差的问题。

针对热电偶元件测温存在测量误差较大的问题,在应用最小二乘法实现热电势和温度特性的线性处理基础之上,提出一种基于分段拟合的热电偶测温控制方法,给出热电偶测温控制的动态分段拟合推导公式,并采用809C52单片机对该方法进行模拟实验。实验结果表明,该测温方法简捷高效,误差可控制在1%之内,可适用于智能仪表和实时控制。

2 热电势与温度间的非线性关系

热电偶的工作原理是基于热电效应,在金属中存在大量自由电子,不同的金属导体,其自由电子密度不同^[7,8]。两种不同导体A和B相接触时,由于自由电子扩散而产生的电势差称为接触电势,当温度为 T 时,其值 $E_{AB}(T)$ 为

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A(T)}{n_B(T)}, \quad (1)$$

式中 k 为玻兹曼常数, e 为电子电量, $n_A(T)$ 和 $n_B(T)$ 分别是A和B两种导体中自由电子密度,与温度有关。而同一种导体,当两端温度 T 和 T_0 不同时,由于热端自由电子动能大,向较冷的一端扩散,形成的电势差称为温差电势,其值为

$$E_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT, \quad (2)$$

式中 σ_A 为温差系数,与导体材料和温度有关。因此,当热电偶测温时,回路中总的热电势 $E_{AB}(T, T_0)$,等于两个不同导体接触点的接触电势和两导体的温差电势相加

$$E_{AB}(T, T_0) = [E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0)] + [-E_A(T, T_0) + E_B(T, T_0)]。 \quad (3)$$

由上述公式(1)~(3)不难看出,热电偶热电势与温度之间关系呈明显非线性。

3 基于分段拟合的线性化方法

热电偶测量温度时,将温度数据转换成电信号时,存在非线性问题,在一定程度上影响了测温的精度。为了提高基于热电偶的测温控制系统测量精度,在应用最小二乘法实现热电势和温度特性的线性处理基础之上,提出一种基于分段拟合的热电偶测温控制方法。

3.1 最小二乘法拟合

最小二乘法拟合的基本思想是,求拟合曲线 $y=s(x)$,使得观测实验数据 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, m$)与估计点 $(x_i, s(x_i))$ 的距离平方和达到最小。

给定观测数据 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, m$),求因变量 x 与因变量 y 的函数关系: $y=s(x, P_0, P_1, \dots, P_n)$,其实质是在函数类 $s(x) \in \text{span}\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\}$ 上存在唯一的函数

$$s(x) = P_0\varphi_0(x) + P_1\varphi_1(x) + \dots + P_n\varphi_n(x), \quad (4)$$

求给定点 x_i 上的误差 $\delta_i = s(x_i) - y_i$, ($i=1, 2, \dots, m$),使得 δ_i ($i=1, 2, \dots, m$)的平方和最小。这里

$\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x) \in C[a, b]$ 是线性无关函数组, 若在 $[a, b]$ 上给出一组数据 $\{(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, m\}$, $x_i \in [a, b]$ 及一组相应权重 $\{\rho_i > 0, i=1, 2, \dots, m\}$, 要求 $s(x) = \text{span}\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\}$, 使得

$$I(P_0, P_1, \dots, P_n) = \min \sum_{i=0}^m \rho_i [(s(x_i) - y_i)]^2, \quad (5)$$

式(5)是关于 $P_0, P_1, \dots, P_n$ 的多元函数, 求最小值即是求多元函数的极值。通过求多元函数的极值方法^[9,10], 从而可得到拟合曲线 $y = s(x)$ 。

在实际测量时, 由测得的观测值 $E_{AB}(T, T_0)$, 来求测量温度 T 。 x_i 与 E 相对应, $y_i = s(x_i)$ 与 T 相对应。应用最小二乘法拟合曲线时, 首先要确定 $E_{AB}(T, T_0)$ 的形式, 为了进一步提高测量精度, 本文选用高阶多项式拟合, 其形式为

$$E_{AB}(T, T_0) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n. \quad (6)$$

如果为了达到好的拟合精度, 需要较高的曲线阶数, 但这给计算带来的一定的复杂性, 不利于实时应用在实时控制类系统中^[9]。

为平衡测量精度和实时计算响应速度^[10,11], 选用二次多项式拟合用于提高实时响应速度, 其形式为

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (7)$$

式中 a 、 b 和 c 为任意实数, 且满足约束条件

$$\begin{cases} nc + b \sum_{i=1}^n x_i + a \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i, \\ c \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + a \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ c \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 + a \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i. \end{cases} \quad (8)$$

3.2 动态分段拟合

面对较多数据点进行拟合时, 只采用单一的多项式拟合, 难以取得较好的精度效果。在实施温度和热点偶函数关系的线性化过程中, 根据拟合精度的要求采用构造动态分段拟合的方法解决这个问题。根据拟合精度来确定分段位置以便达到最优化, 只要控制好分段位置便可达到高精度拟合要求, 这样即可简化拟合公式, 有可以提高拟合精度。

由公式(7)可知, a 、 b 和 c 为满足式(8)的二阶多项式拟合系数, 决定着拟合函数的构造。如果采用单一的函数系数进行拟合, 难以满足不同测温区间的拟合精度。为了提高拟合精度, 本文提出对拟合系数进行动态优选的方法。

设任意给定测温摄氏 $T \in [m, n]$, 测温相对误差 Δt , 要求满足 $|\Delta t| \leq \epsilon$, 其中 m 和 n 为实数, $\epsilon > 0$ 。根据观测数据, 应用最小二乘法, 求二次多项式拟合系数 a 、 b 和 c , 将其代入式(7)构造拟合函数, 求得测试温度 T_1 , 其相对误差 Δt_1 。若 $|\Delta t_1| > |\Delta t|$, 则称该组二次多项式拟合系数 a 、 b 和 c 为测温区间 $[m, n]$ 满足 $|\Delta t| \leq \epsilon$ 条件的不可选用拟合系数; 否则, 称为测温区间 $[m, n]$ 满足 $|\Delta t| \leq \epsilon$ 条件下可选用拟合系数。

若二次多项式拟合系数 a 、 b 和 c , 为测温区间 $[m, n]$ 满足 $|\Delta t| \leq \epsilon$ 条件下的不可选用拟合系数, 则将 $[m, n]$ 划分为 $[m, L]$ 和 $[L, n]$ 两个新区间, 其中 $M < L < N$, 分别对 $[m, L]$ 和 $[L, n]$ 求取满足 $|\Delta t| \leq \epsilon$ 条件的可选用拟合系数^[12]。关于区间分段标识 L 的选取方法, 可根据不同的应用系统而采用不同的方法, 例如根据历史测温数据而经验选定, 或者采用 $L = (M + N)/2$ 的逼近方法等。

给定测温区间 $[m, n]$, 测温相对误差 Δt , 存在满足 $|\Delta t| \leq \epsilon$ 条件下的可选用拟合系数, 根据历史观测数据, 将最小二乘法用汇编语言编程实现, 从而保证对各个测温区间的可选用拟合系数的高效求取^[13]。程序流程图如图 1 所示。

4 实验结果与分析

4.1 实验所需硬件

所采用的硬件^[12] 电路中有 809C52 单片芯片、74LS373 地址锁存器、74LS138 译码器、74F04 非门、

74LS00 或非门、HM6264 存储器、8255 并行口、ICL7109AD 转换器、LM78120CT 稳压块、LM79120CT 稳压块、LM7805 稳压块、HA-OP07H 放大器、BC7281 键盘显示芯片、74LS164N 移位寄存器、ULN2803A 反相驱动器以及一些分立元件。

4.2 实验的软件实现

当拟合精度要求较高时,拟合函数覆盖的测温区间变小,反之,拟合函数覆盖的测温区间相对变大。拟合程序从 0°C 开始用最小二乘法,求出 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 间的拟合系数,得出该区间的拟合表达式,依次求出各点误差与要求误差相比。若小于要求误差,将温度区间扩大到 $0\sim 2^{\circ}\text{C}$,得出新的拟合表达式,计算个点误差与要求误差比较,依次类推。直到温度区间中出现某点误差大于要求误差,则可确定上一区间内满足精度要求的拟合表达式。

本实验用 C 语言环境实现计算拟合系数程序、误差计算程序和数据拟合程序。考虑到工业现场大多环境恶劣,所以采用 809C52 芯片,用 MCS-51 语言编制了单片机控制的热电偶测温程序。实验的软件实现模块^[13,14]包括键盘输入程序、发送字节程序、接收字节程序、按键处理程序、数码显示程序、取补程序、负数处理程序、双字节二进制数左移四位程序、满量程电压数程序、字节处理程序组成,主程序的流程图如图 2 所示。

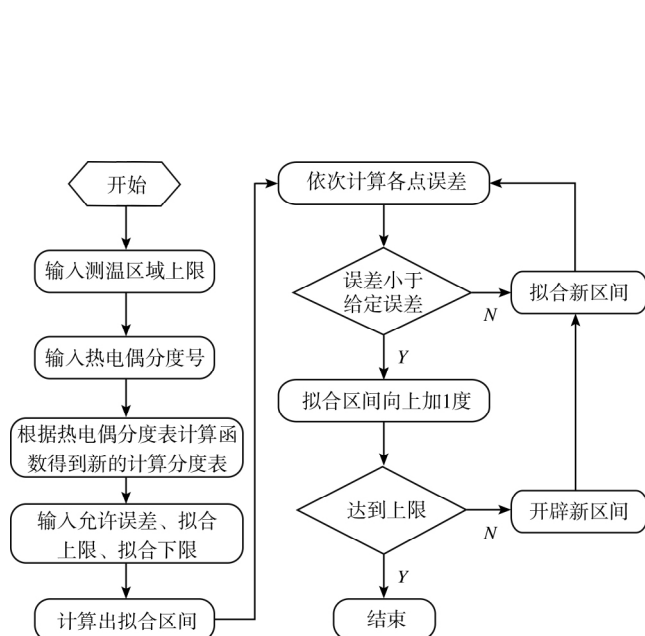


图1 动态拟合流程图

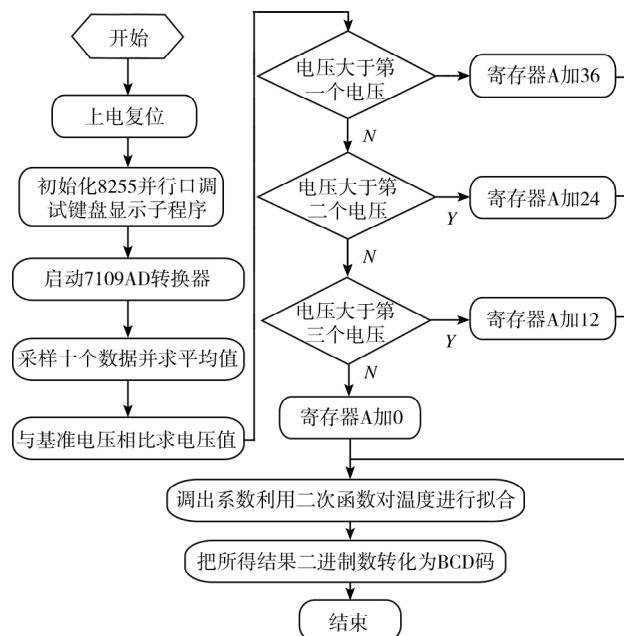


图2 主程序流程图

4.3 实验结果与分析

由于实验中得到的热电偶标定值不是以度为单位连续变化的,所以拟合时只是采用了人工分段的方法。热电偶电压与温度的曲线可明显分为两段,前段为直线后段为二次函数曲线,所以实验中分两段进行拟合。

为了验证本文提出的分段拟合测温方法的有效性,采用 809C52 芯片,用 MCS-51 语言将该方法编制成单片机控制的热电偶测温控制程序,对 $0\sim 1\ 300^{\circ}\text{C}$ 的测温区间进行模拟实验^[15,16],要求测温相对误差小于 0.02。

通过程序计算结果显示,将该测温区分区间划分为 $0\sim 700^{\circ}\text{C}$ 和 $700\sim 1\ 300^{\circ}\text{C}$ 两个测温区间,各区间满足测温相对误差小于 0.02 条件的可选拟合系数如表 1 所示:

表1 各测温区间的拟合系数

测温区间/ $^{\circ}\text{C}$	a	b	c
$0\sim 700$	0.091 037 712	24.270 777 373	41.110 723 014
$700\sim 1\ 300$	1.841 386 115	67.246 596 974	1 241.247 943 663

选用表 1 的各区间相应拟合系数,随机对 $0\sim 1\ 300^{\circ}\text{C}$ 的温度进行模拟测试,结果表明该测温方法简捷高效,并且相对误差可以控制在 1% 之内。对各个典型温度的测试结果统计如表 2 所示,由表 2 的统计结果来看,最大相对误差为 0.99%,该方法可适用于智能仪表和实时控制。

表2 测温结果与分析

实际温度/℃	热电势/mv	计算温度/℃	绝对误差/℃	相对误差
100	2.4	99.884 965	-0.115 034	-0.001 150
200	6.4	200.172 602	0.172 602	0.000 863
300	10.3	300.757 920	0.757 920	0.002 526
400	14.0	398.744 997	-1.255 002	-0.003 137
500	17.7	499.224 687	-0.775 312	-0.001 550
600	21.4	602.196 989	2.196 989	0.003 661
700	24.8	699.017 836	-0.982 163	-0.001 403
800	27.7	794.394 359	-5.605 640	-0.007 757
900	30.3	894.234 233	-5.765 766	-0.006 406
1 000	32.5	1 000.697 625	0.697 625	0.000 697
1 100	34.5	1 110.950 171	10.950 171	0.009 954
1 200	36.0	1 206.806 857	6.806 857	0.005 672
1 300	37.2	1 287.858 297	-12.141 702	-0.009 339

5 结论语

热电偶的热电势与温度呈非线性关系,在很大程度上影响了热电偶测量的精度。在应用最小二乘法实现热电势和温度特性的线性处理基础之上,通过应用对不同测试区间的拟合系数进行动态优选,提出一种基于分段拟合的热电偶测温控制方法,采用汇编语言在 809C52 单片机上编程实现。模拟实验结果表明,该测温控制方法简捷高效,误差可控制在 1% 之内,可适用于智能仪表和实时控制。

参 考 文 献

- [1] 陈清清,潘江,袁定琨. 一种新型高温热电偶性能测试系统的研制[J]. 计量学报,2022,43(11): 1424-1430.
- [2] 王喆,余松林,沈文杰,等. 校准短型廉金属热电偶相关问题的研究[J]. 计量学报,2020,41(6):650-655.
- [3] 靳浩元,刘军. 测量不确定度的评定方法及应用研究[J]. 计量科学与技术,2021,65(5):124-131.
- [4] 张鹏,王飞云,史蒲英,等. Nadcap 热处理认证高温测量中热电偶的技术探究[J]. 工业加热,2022,51(9):64-68.
- [5] 张贤高,陈佑,张欢. 热电偶试验系统误差的纠正方法[J]. 电工材料,2022,3: 3-5.
- [6] 张蔡婕,张贤高,陈佑. 热敏电阻温度特性实验的滞后性误差探讨[J]. 电子世界, 2019(17): 35-36.
- [7] CHEN J, PENG X D, XUE W D, et al. The compatibility between thermocouple wires and sheath alloy for small diameter mineral-insulated metal-sheathed(MIMS) thermocouples in long-term aging[J]. Measurement, 2019, 132(1):199-206.
- [8] 陈 猛,郑一鸣,陈非凡. 多类型温度传感器自适应智能感知节点研究[J]. 仪表技术与传感器,2022,6: 29-34.
- [9] 梁旭铭. 基于 LXI 的热电偶采集系统软件设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2022.
- [10] 徐志钮,胡宇航,赵丽娟,等. 基于改进二次多项式拟合的布里渊频移快速高精度提取算法[J].光谱学与光谱分析,2020,40(3):842-848
- [11] WANG Y, LIANG J C. Analysis of measurement process characteristics based on measurement uncertainty[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022,43(9):1241-1244.
- [12] 陈非凡. 仪器设计技术基础[M]. 2 版.北京: 清华大学出版社,2019.
- [13] 王茵,李长齐,李俊礼. 一体化智能温度变送系统的设计[J]. 仪表技术与传感器,2019(4):123-126.
- [14] JIANG B, CHEN M, CHEN F. A network interface device for networked control system with time-driven mode[J]. Micro-processors and Microsystems, 2019, 64:1-11.
- [15] REN X, ZENG D, WANG Y, et al. Temperature measurement of a turbulent buoyant ethylene diffusion flame using a dual-thermocouple technique[J]. Fire Safety Journal, 2020,132:103061.
- [16] FERREIRA L B, CUNHA F F D. New approach to estimate daily reference evapotranspiration based on hourly temperature and relative humidity using machine learning and deep learning[J]. Agricultural Water Management, 2020, 234:106113.

(责任编辑:刘庆松)