

引用格式:刘月,张柯,金龙旭,等.空间相机主动热控系统温度采集与处理方法研究[J].电光与控制,2017,24(8):87-90. LIU Y, ZHANG K, JIN L X, et al. Temperature acquisition and processing method for active thermal control system of space camera[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(8):87-90.

空间相机主动热控系统温度采集与处理方法研究

刘月^{1,2}, 张柯¹, 金龙旭¹, 金恩如³

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100000; 3. 长春理工大学, 长春 130022)

摘要: 针对空间快响相机多通道、宽测温范围的温度数据快速精确采集要求,分析了温度数据采集电路中 NTC 热敏电阻的非线性特性,总结了热敏电阻非线性传感特性的补偿方法,并以航天热控设计中 MF501 型 NTC 热敏电阻为例,提出一种在卡尔曼滤波方法下的基于电压-温度采集数据的有理式回归模型,并通过 Matlab 编程运算,对一类基于电压-温度数据的回归模型进行仿真分析与性能参数对比。实验表明:在 $-10 \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,应用最优回归模型补偿后的温度采集精度为 $0.134\text{ }^{\circ}\text{C}$,内存占用量为 56 字节,综合性能优于传统的数据采集处理方法,通用性强、使用方便,可以在保证低资源占用量的条件下有效提高温度数据的采集精度和测量范围。

关键词: NTC 热敏电阻; 温度采集电路; 卡尔曼滤波; 电压-温度特性曲线; 有理式回归

中图分类号: V443 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.08.018

Temperature Acquisition and Processing Method for Active Thermal Control System of Space Camera

LIU Yue^{1,2}, ZHANG Ke¹, JIN Long-xu¹, JIN En-ru³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China;
3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In view of multi-channel, wide temperature range of temperature data acquisition requirements of space camera, analysis is made to the nonlinear characteristic of the NTC thermistor in temperature acquisition circuit, and the method for compensation of nonlinear thermistor sensing property is presented. Taking MF501 NTC-thermistor in design of aerospace thermal control as an example, a new kind of rational regression model of voltage-temperature data is proposed based on Kalman filtering, and simulation analysis is made to which performance parameters by Matlab programming. The experimental results show that: 1) In temperature range of $-10 \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the temperature measurement accuracy by using the rational regression model is $0.134\text{ }^{\circ}\text{C}$, the memory usage is 56 bytes, and its comprehensive performance is better than that of the traditional data acquisition and processing method; and 2) The method has strong commonality and is convenient for application, which can improve the acquisition accuracy and measurement range of the temperature data effectively with low resource consumption.

Key words: NTC thermistor; temperature acquisition circuit; Kalman filtering; voltage-temperature characteristic curve; rational regression

0 引言

目前空间大型光学遥感器提出了对空间相机多通

道、多区域快速精确控温的要求,这就需要测温环节的高准确性和高稳定性。负温度系数(Negative Temperature Coefficient, NTC)热敏电阻(Thermally Sensitive Resistor, TSR)由于其精确度高、灵敏度高、响应时间短、稳定性好、微型化、结构简单、重复性好、价格低廉等优点,使其可以满足高精度的温度测量需求,作为温度传感器应用于空间相机的热控系统。近 40 年来,热敏电阻的种类越来越多,性能不断改善,特别是单晶硅和单

收稿日期:2016-08-11

修回日期:2016-09-20

基金项目:国家“八六三”计划项目(863-2-5-1-13B);吉林省科技发展计划资助项目(20126016)

作者简介:刘月(1991—),女,黑龙江伊春人,硕士生,研究方向为空间相机主动热控制技术。

晶锗热敏电阻的出现^[1-2],使其与集成电路建立了密不可分的联系,微电子时代从此开始。

为提高测量精度,温度测量系统普遍采用多次测量求取平均值的方法。实际中,由于存在传感器和环境噪声等随机干扰,致使测量结果的可信度大大降低,测量精度往往也难以满足要求^[3]。此外,由于 NTC 热敏电阻的特性曲线存在严重的热电非线性特点,对其非线性误差进行高精度补偿或有效的拟合处理是扩大其测量范围、提高其测量精度亟待解决的问题。目前,常用的热敏电阻非线性传感特性的补偿方法主要有:1) 硬件电路补偿法^[4],对电子元器件的要求较高,在宽温度范围使用时,硬电路中的噪声和温度漂移会造成电路复杂、可靠性和准确度低等不足;2) 查表线性插值法^[5],对于宽温度范围的测量,尤其是多通道数据,对硬件电路设计和控制器数据区的存储容量要求较高;3) 热敏电阻器经验公式法^[6],计算量较大,在宽温度范围测量应用时,测温误差较大;4) 最小二乘法^[7-8],计算简单、应用广泛,但当数据变化幅度较大时,拟合结果不理想,误差较大;5) 多项式趋向法^[9-10],对于小量程的热敏电阻测温系统具有较好的补偿效果,但在宽温度范围应用时,需要多项式具有较高的阶数,对硬件的要求较高;6) 分段多项式法^[11],与分段线性化方法比较有着一定的优越性,但计算过程复杂,系统稳定性较差;7) 线性化的研究方法^[12-13],近年来很多学者对此种方法进行了大量的研究分析与应用,航空航天应用中在数据量较大的情况下误差较大,且需要复杂的公式推导。

为获得相机精确可靠的温度测量结果,本文设计了一种在卡尔曼滤波方法下的基于电压-温度采集数据的有理式回归模型采集方案。

1 温度数据采集方案分析

主动热控系统以 DSP 为控制核心,采用多个并联测温回路来实现空间相机本体多区域温度测量与控制,系统主要分为测温回路和控温回路两个部分。其中,测温回路通常由热敏电阻、信号处理电路、多路模拟开关、A/D 转换器等组成,如图 1 所示。

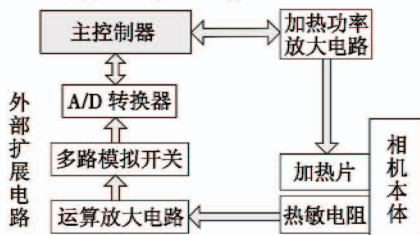


图 1 主动热控系统原理框图

Fig. 1 Principle diagram of active thermal control system

1.1 热敏电阻热电特性分析

航天应用中^[14],热敏电阻阻值与温度关系为

$$R = R_0 \exp(B(1/T - 1/T_0)) \quad (1)$$

式中: T 为被测绝对温度; T_0 为参考温度,取 298 K; R_0 为 T_0 温度下的电阻值(单位 k Ω); R 为 T 工作温度下的电阻值(单位 k Ω); B 为材料常数,范围一般在 3000 ~ 5000 K。

由式(1)可以看出,阻值变化与温度变化为指数关系,随温度升高,热敏电阻阻值迅速下降,灵敏度高是热敏电阻测温的主要优点。从上式可知,热敏电阻的工作温度与材料常数 B 有关,不同型号的热敏电阻有与之对应的恒定的 B 值。实际上,热敏电阻的 B 值也并非恒定值,其变化大小因材料构成而异,最大甚至可达 5 K/ $^{\circ}\text{C}$ 。

与此同时,式(1)只有在参考温度 T_0 或阻值 R_0 的有限范围内才有一定的精度,在较大的温度测量范围内应用固定 B 值代入求解时,所得结果将与实际温度之间存在一定误差,不适宜宽温度范围的温度测量,大大限制了热敏电阻在遥感系统中的应用。因此,需要寻找适合工程实用的宽范围高精度的热电特性关系。

1.2 热电特性标定方法

传统温度数据的获取方法通常是通过信号处理电路的电压输出值计算得到热敏电阻的阻值,依据电阻-温度数据表通过插值的方法得到实际温度值。而本文立足空间相机在轨工作的热控需求,除去电压-电阻-温度转换关系中的电阻环节,基于图 2 所示的信号处理电路,直接进行电压-温度转换,大大减少了复杂转换过程中的误差,提高了测温精度。

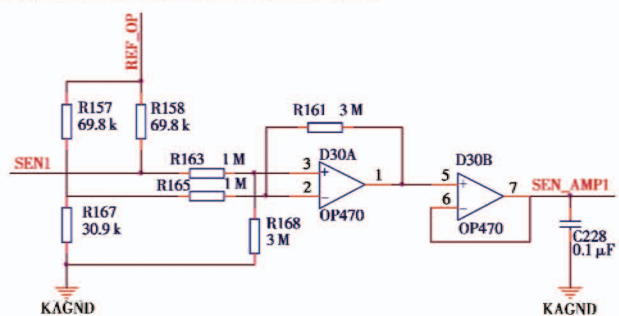


图 2 热敏电阻桥式温度采集电路

Fig. 2 Thermistor temperature measurement bridge circuit

本文采用的是电压-温度标定法,基于带有图 2 所示的热敏电阻桥式温度采集电路的硬件电路板,外接多回路热敏电阻测温装置置入 DC-2006 低温恒温槽,把温度值作为输入值,电压值作为输出值,进行间隔为 1 $^{\circ}\text{C}$ 的电压-温度标定实验,得到热敏电阻 A/D 采集电压标定结果。这样,在实际主动热控系统的温度数据的获取过程中,被测对象的温度值经过信号处理电路之后转换为满足 A/D 转换器采集电压输入要求的电压值,温

度的变化就能直接反映到电压上,经过控制器得到的电压数据,采用下文提到的曲线回归方法得到回归形式及相应的模型参数,便可直接得到实际温度值。

1.3 卡尔曼滤波方法

1960 年, KALMAN R E 描述了如何给出离散数据线性滤波问题递归解的一种新方法,后人称之为卡尔曼滤波方法,该方法是一种高效的递归滤波器(自回归滤波器),它能够从一系列完全包含噪声的测量中估计动态系统的状态。这个估计可以是对当前状态的估计(滤波),也可以是对将来状态的估计(预测),还可以是对过去状态的估计(插值或平滑)。目前,该方法已被广泛应用于航空导航系统、雷达跟踪、声纳搜索、卫星轨道确定等诸多领域。

卡尔曼滤波方法用反馈控制的方法估计过程状态:估计某个时刻的状态,然后以(含噪声的)测量变量的方式获得反馈,因此卡尔曼滤波可分为时间更新和测量更新两个部分。时间更新方程负责及时向前推算当前状态变量和误差协方差估计值,以便为下一个时间状态构造先验估计;测量更新方程负责反馈,它将先验估计和新的测量变量结合以构造改进的后验估计。最后的估计算法成为一种具有数值解的预估-校正算法^[15]。

递归推算卡尔曼滤波器最吸引人的特性之一,每次只根据以前的测量变量递归计算当前的状态估计,这使它比其他滤波器更容易实现。卡尔曼滤波方法由 5 个基本公式构成,工作流程如图 3 所示^[16]。

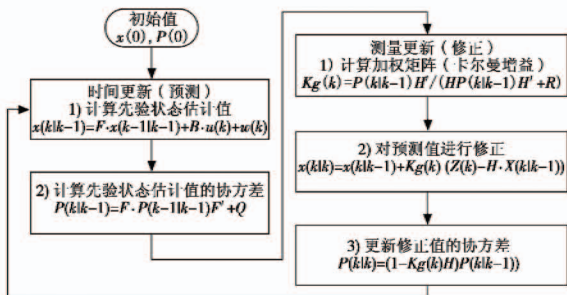


图 3 卡尔曼滤波算法流程图

Fig. 3 Flow chart of Kalman filtering algorithm

采用卡尔曼滤波平滑算法分别对来自多个温度采集通道的数据进行后处理,可以很大程度上减小误差。由图 4(为方便 C 语言对 DSP 编程,增强可读性,纵坐标为除以 1024 后的数值)的仿真结果可以看出,经过卡尔曼滤波后的电压-温度(U-T)数据十分平滑,很大程度上抑制了噪声干扰对 U-T 标定的影响。根据该 U-T 标定数据,本文采用曲线回归方法离线求取 A/D 转换器输入电压与 NTC 热敏电阻温度之间的模型参数。在实际使用中直接将电压测量值代入已经预先得到的带有离线求取参数的回归模型中,即可得到温度值。

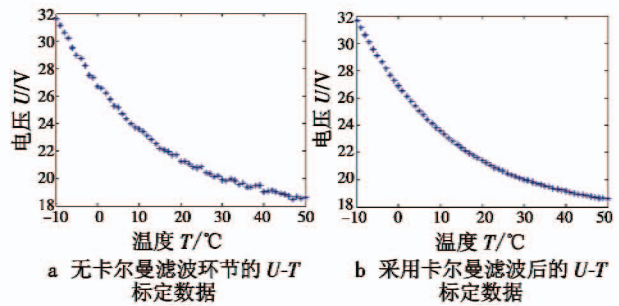


图 4 卡尔曼滤波在温度数据采集中的应用仿真

Fig. 4 Kalman filtering application simulation in temperature data acquisition

2 热电特性曲线回归

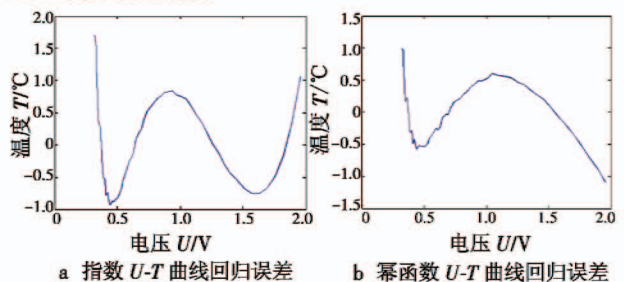
针对传统温度补偿方法在宽范围使用时的不足,根据函数逼近原理,应用 Matlab 软件对 NTC 热敏电阻特性测试的数据处理方法^[17-19],本文提出几种基于 Matlab 曲线拟合工具箱的曲线回归方法,充分考虑硬件成本、函数运算复杂程度和曲线回归的稳定程度,选取基于指数函数、幂函数、多项式和有理式的曲线回归方法,对信号处理电路输出电压 U 与热敏电阻温度 T 关系曲线进行回归处理。图 5(为方便 C 语言对 DSP 编程,增强可读性,横坐标为除以 1024 后的数值)为利用不同回归方法的仿真结果,表 1 为部分仿真参数对比。

表 1 曲线回归参数表

Table 1 Curve regression parameters

回归模型	SSE	R-square	RMSE	MAX	内存占用量/Byte
指数模型	28.310 0	0.998 5	0.704 7	1.704 3	39
幂函数模型	13.384 5	0.999 3	0.480 4	1.097 6	17
五次多项式模型	3.463 2	0.999 8	0.250 9	0.570 4	92
六次多项式模型	0.945 1	1.000 0	0.132 3	0.289 8	122
三次分子有理式模型	0.171 7	1.000 0	0.055 4	0.134 0	56
四次分子有理式模型	0.140 3	1.000 0	0.050 5	0.130 4	78

表中各参数含义如下:1) SSE 为误差平方和,体现了拟合值与实际值的偏离程度,该参数越趋于 0,说明曲线拟合性能越好;2) R-square 为多重决定系数,该统计量说明拟合曲线对数据变换趋势的拟合成功度,该参数越趋于 1,说明曲线拟合性能越好;3) RMSE 为均方根误差,该参数越趋于 0,说明拟合性能越好;4) MAX 为最大误差。



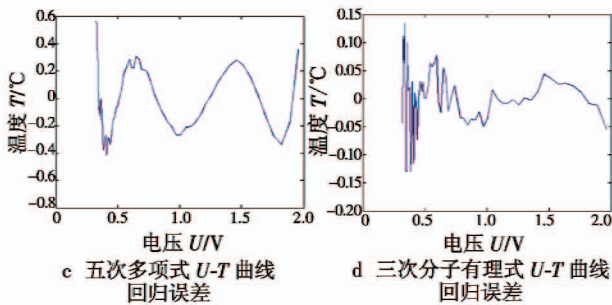


图 5 测温电路 $U-T$ 曲线回归误差

Fig. 5 $U-T$ curve regression error of temperature measurement circuit

由仿真结果可以看出:指数函数回归模型精度为 $1.7043\text{ }^{\circ}\text{C}$,均方根误差为 $0.7047\text{ }^{\circ}\text{C}$,还不够理想;幂函数回归模型精度为 $1.0976\text{ }^{\circ}\text{C}$,均方根误差为 $0.4804\text{ }^{\circ}\text{C}$,同样不够理想;随着多项式回归模型次数的增加,回归效果明显提高,但是随之而来的问题是内存占用量的快速增加,内存占用量已十分庞大的六次多项式回归模型精度仅达到了 $0.2898\text{ }^{\circ}\text{C}$;有理式回归模型较低的分子次数就可以达到较好的回归效果,其中,三次分子有理式模型的精度就可以达到 $0.1340\text{ }^{\circ}\text{C}$,均方根误差达到 $0.0554\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水平。

综合考虑回归精度和函数运算的复杂程度,三次分子有理式回归模型精度优于 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$,均方根误差优于 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时在指令执行周期数上大大减小,针对 MF501 热敏电阻及相应的信号采集电路为最优。

3 结束语

结果表明:当 NTC 热敏电阻器在宽温度范围内使用时,基于电压-温度数据表的处理方法大大减小了传统热敏电阻温度采集数据处理转换过程中的换算误差,在工程实现中是一种十分巧妙又灵活的方法;同时,基于有理式拟合方法的电压-温度非线性拟合效果远优于现有的多项式拟合和其他函数形式拟合方法,最优形式的拟合误差最大为 $0.1340\text{ }^{\circ}\text{C}$,且在实际的工作过程中只占用较少的指令周期数,可应用于高精度测量系统。此方法使用灵活,只需修改拟合有理式系数即可适用于不同型号的热敏电阻温度传感器,且通用性强,对于一类温度传感器的参数特性曲线都有着较高的拟合精度和其他方法无法比拟的优越性,作为一种可行、实用的非线性拟合方法,可用于将 DSP 或 PLC 作为数据处理核心模块的电路,并广泛应用于要求较高的测温控制系统,在保证测量精度的同时,降低硬件成本,节省工作时间。而且,在相同精度要求下,与集成温度传感器相比,具有更优异的价格成本优势,在数据采集分析系统中亦是一种有效的数据处理方法。

参考文献

- [1] 赵天池. 传感器和探测器的物理原理和应用[M]. 北京:科学出版社,2008:291-304.
- [2] 何道清,张禾,谌海云. 传感器与传感器技术[M]. 2版. 北京:科学出版社,2008:187-228.
- [3] 卢胜利,刘美玲,田彦彦. 基于卡尔曼滤波的多温度传感器数据融合系统[J]. 现代科学仪器,2013(1):65-68.
- [4] 崔文德,李铁鹏,牛建永,等. 热敏电阻低温测量方法研究[J]. 宇航计测技术,2010,30(4):25-31.
- [5] 李铭,卢彦飞,袁刚,等. 应用先验插值校正 CT 金属伪影[J]. 液晶与显示,2015,30(6):1032-1038.
- [6] 兰玉岐,杨思锋,陈光明,等. 测量超低温用 NTC 热敏电阻的制备和性能研究[J]. 功能材料,2010,41:438-440,444.
- [7] 姚君磊,赵红,赵凯璇,等. 基于最小二乘法的 NTC 热敏电阻动态标定方案探究[J]. 节能技术,2013,31(4):363-366.
- [8] 孙辉,刘慧,罗安治,等. 应用模型线性化和最小二乘估计的导引头指向精度标定[J]. 光学精密工程,2015,23(7):2060-2067.
- [9] 王彪. 多路温度测量仪的设计与实现[J]. 电子测试,2011,6(6):90-93.
- [10] 周锦荣,陈焕庭,周小方. 白光 LED 色温的非线性动态预测模型[J]. 发光学报,2016,37(1):106-110.
- [11] 程双双,姜平,肖红升,等. NTC 热敏电阻分段曲线拟合[J]. 煤矿机械,2009,30(10):41-43.
- [12] 樊需,胡旭,余俊. 热敏电阻特性的线性化方法[J]. 船电技术,2015,35(12):49-53.
- [13] 王驰,许婷婷,毕书博,等. 测量自聚焦光纤透镜聚焦常数的曲线拟合算法[J]. 光学精密工程,2015,23(12):3309-3314.
- [14] 中华人民共和国航天工业部. QJ1694-89 热敏电阻温度传感器通用技术条件[S]. 北京:航天工业部,1989.
- [15] 李惠光,慈春令,侯培国. 卡尔曼滤波器在角位移检测系统的应用[J]. 仪器仪表学报,1994,15(2):202-205.
- [16] LAVIOLA J J. A comparison of unscented and extended Kalman filtering for estimating quaternion motion[C]// Proceedings of the American Control Conference, IEEE Press,2006:2435-2440.
- [17] 闻福三,赵京明,王玲玲,等. 基于 Matlab 的 PTC、NTC 传感器实验[J]. 实验室研究与探索,2013,32(11):69-73.
- [18] 杜金祥,杜宇轩. 基于 MATLAB 对数函数拟合的热敏电阻特性研究[J]. 山西电子技术,2013(1):94-96.
- [19] 胡勇,祝忠明,周璐. NTC 热敏电阻 R-T 特性的线性化研究[J]. 信息通信,2013(9):28-29.