

星载黑体高精度集成化温控系统设计

黑花阁^{1,2}, 李潇雁^{3*}, 李璐芳^{1,2}, 蔡萍¹, 陈凡胜^{1,3}

1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 随着航天红外技术向高量化、高集成化方向的发展,传统基于 CPU 或 DSP 的黑体测控系统无法满足高集成化和高精度的需要。针对上述问题,设计了基于 FPGA 的星载黑体高精度集成温控系统。该系统以 FPGA 为核心控制单元进行温度采集和控制,实现多功能高速并行处理。黑体测温模块采用三线制惠斯通电桥减小导线电阻影响,然后在信号调理部分采用集成运算放大器组成的三级有源滤波和放大实现了对电气输出的低噪声放大。与传统仪用放大器加无源滤波的信号调理方式相比,该方法具有更强的干扰抑制能力。同时,对铂电阻阻值与温度的非线性误差以及测温系统电路误差,提出了基于多项式模型及最小二乘理论的分级拟合校正方法,进一步提高了测温精度。控温模块采用新型模糊控制和增量式 PID(FIPID) 结合减小过冲,加快收敛速度。基于精密标准电阻的实测结果表明该系统测温精度在 247~375 K 范围内为 0.035 K,比校正前精度 0.383 K 提高了 90.9%。控温仿真实验表明与 PID 控温相比,FIPID 的过冲为零,而 PID 算法有 12.4% 的过冲,且收敛速度提高了 64%。地面热真空和在轨实际控温实验表明在 256~367 K 范围内实测控温精度为 0.039 K,该方法已成功应用于某型号空间红外相机,且满足在轨高精度定标要求。该系统具有测控精度高、动态范围大、易于集成化的优点,可推广应用于星上其他高精度主动温控。

关键词: 星载黑体; 集成化设计; FPGA; 高精度测温; 模糊增量 PID

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220852

0 引言

航天红外相机发射后,由于仪器本身原因或者环境改变,仪器性能会发生变化,需要进行在轨定标确定探测器响应的变化量^[1-2]。黑体型辐射源是辐射最接近黑体辐射的人造辐射源,是最常用的光电仪器红外辐射定标标准源,可用于对红外仪器进行在轨光谱标定、辐射定标和非均匀性校正等^[3-5]。黑体测温精度直接影响定标精度^[6-7],随着航天红外技术向高量化发展,对黑体测温精度提出了更高的要求。

传统的高精度测温电路采用三线制或四线制连接,电阻值转换为电压信号,经过仪用放大器放大后进行模数转换为数字量,控温多由中央处理

器 (Central Processing Unit, CPU) 或数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 实现,采用 PID (Proportion Integration Differentiation) 控制方式,生成脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 波驱动加热元件对黑体进行控温。目前面源黑体控温精度达到 0.1 K^[8],腔型黑体控温精度达到 0.05 K^[9]。黑体辐射源具有大惯性、大滞后的特点,使用经典 PID 算法会出现超调和易振荡等问题。近年来出现将模糊控制与 PID 结合的模糊 PID 控制算法 (Fuzzy PID)^[10-12],神经网络和 PID 结合的神经网络 PID 控制^[13],继承 PID 控制思想的自抗扰控制 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC)^[14-15] 等控制算法应用于高精度控温。这些算法在抑制超调和干扰上起到一定作用,

收稿日期:2023-02-05; 修订日期:2023-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目 (61975222)

作者简介:黑花阁,女,工程师,博士生,主要从事空间遥感与光电系统探测、红外光电智能化系统等方面的研究。

导师简介:陈凡胜,男,研究员,博士,主要从事为极限红外探测技术等方面的研究。

通讯作者:李潇雁,男,助理研究员,博士,主要研究方向天基光电探测载荷极限几何定位技术。

因计算量大,多使用 CPU 实现。但随着航天器功能越来越复杂,需要进行集成化设计以降低航天器的功耗和质量。黑体温控作为航天器温控一部分,按集成化设计需要与航天器其他部分温控集成在一起,整个航天器温控包括大量的加热和测温回路,如果使用 CPU 作为控制单元,需要扩展接口以满足整个航天器测控温的需要,不利于集成化小型化设计。相比于 CPU,现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)具有丰富的逻辑资源和高速接口,运行速度快,多个功能模块可并行运行等优点,易于实现集成化设计。

针对复杂空间红外相机在轨黑体定标高精度、实时性和高集成化要求,文中设计了基于 FPGA 的星载黑体高精度集成温控系统。首先介绍集成温控系统组成,分析影响测温精度的因素及误差消除措施;然后在增量 PID 控制的基础上,结合模糊控制,设计了基于 FPGA 的模糊增量 PID 控温;对测控温进行软硬件实现和测试。地面测试、热真空试验和在轨测试表明,该方法可实现在 247~376 K 范围内 0.035 K 的黑体测温精度及 256~367 K 范围内 0.039 K 的控温精度,满足红外相机在轨定标要求。

1 星载黑体高精度温控设计方法

某空间红外相机星上集成温控系统功能见图 1,采用集成化设计,由一片 FPGA 完成对相机所有测控温及与卫星服务单元的 1553B 总线通信功能。FPGA 通过 1553B 总线接收地面的温度控制指令,将温度遥测及工作状态等遥测参数下载到地面。FPGA 除完成

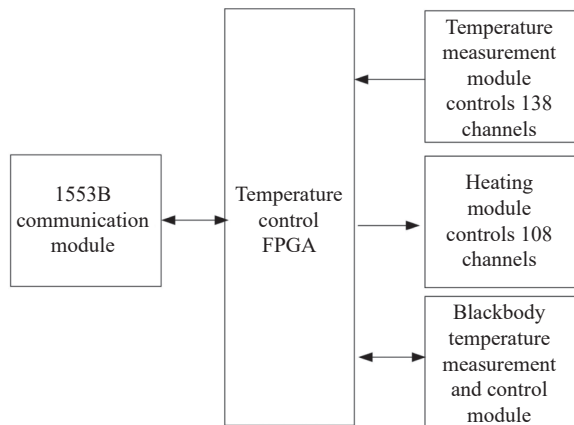


图 1 集成温控系统功能示意图

Fig.1 Diagram of integrated temperature control system

黑体测控温功能外,还对红外相机 138 路热敏电阻和 108 路加热片进行控制。

空间红外相机使用的星载面源黑体见图 2,黑体有效辐射面直径为 120 mm,质量为 2 kg。

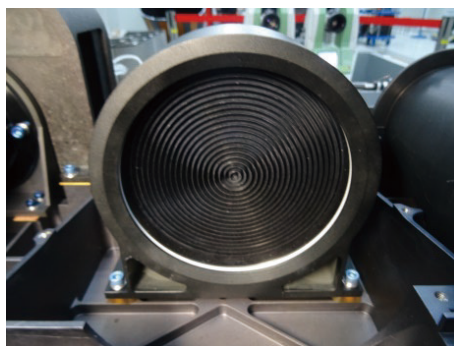


图 2 星载黑体

Fig.2 Spaceborne blackbody

铂电阻测温精度高,稳定性和一致性好,选用陶瓷型 Pt1000 铂电阻作为黑体测温元件,薄膜加热片可以设计成各种形状,易于与被加热对象粘合,选用聚酰亚胺薄膜加热片作为黑体加热元件,加热功率为 40 W。

黑体测控温系统功能示意图见图 3。先将铂电阻 Pt1000 电阻值转换为电压值,经过信号调理电路后送入模数转换器 (Analog-to-digital Converter, ADC) 转换为数字量,由温控 FPGA 进行温度采集和处理。FPGA 根据采集温度和控温算法生成 PWM 波驱动金

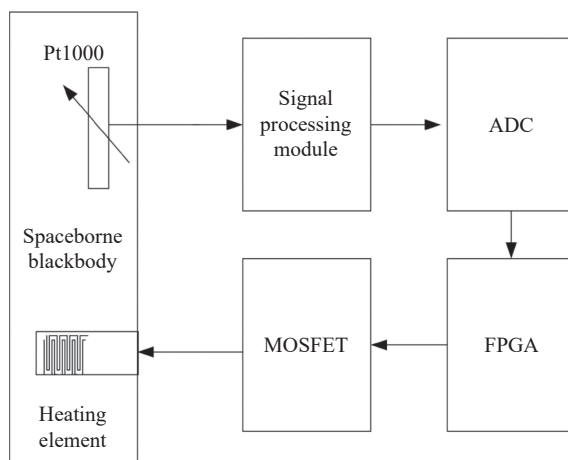


图 3 星载黑体测控温功能示意图

Fig.3 Diagram of temperature measurement and control of spaceborne blackbody

属氧化物半导体场效应管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) 对黑体进行控温。

黑体测温电路见图 4。铂电阻采用三线制连接, 消除连接线电阻和触点电阻对测温精度的影响。惠斯通电桥灵敏度和准确度高, 采用惠斯通电桥将铂电阻阻值转换为电压信号, 电压信号经过由低噪声运算放大器组成三级有源低通滤波和放大的信号调理电

路, 对集成系统热控大功率波动引起的干扰进行抑制, 对小信号进行低噪声放大。滤波放大后的电压信号通过 ADC 转换成数字量, 由 FPGA 采集。运算放大器选用低噪声四运放 OP400, 输入噪声电压 $0.5 \mu\text{Vp-p}$, 共模抑制比为 130 dB , $-55 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内电压漂 $1.2 \text{ pV}/^\circ\text{C}$ 。ADC 选用 12 位串行多通道的 TLC2543, 线性失真最大 $\pm 1 \text{ LSB}$ 。

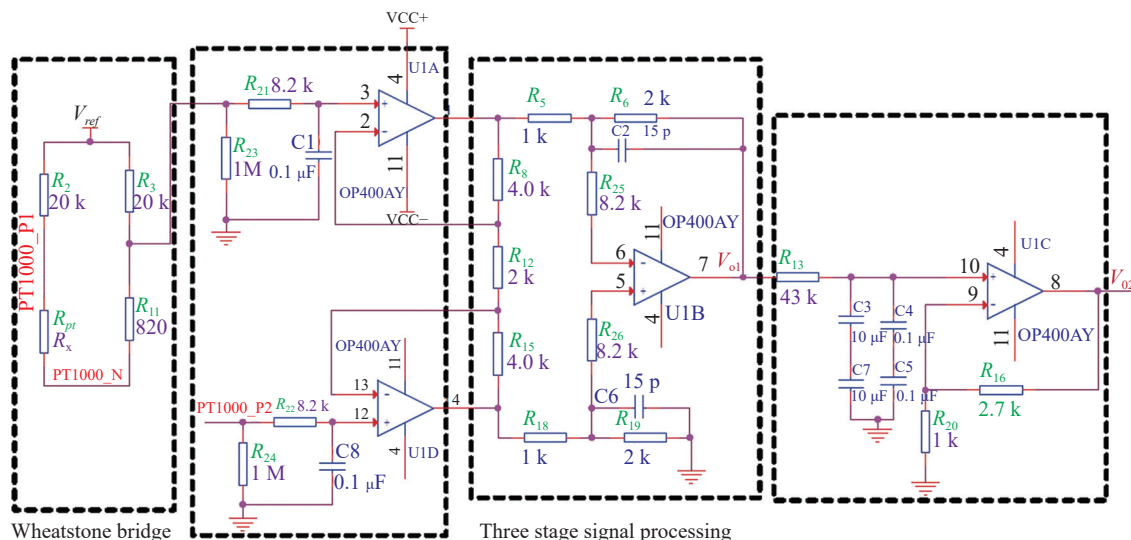


图 4 三线制黑体测温电路

Fig.4 Three-wire blackbody temperature measuring circuit

信号调理电路输出电压 V_{O2} 为:

$$V_{O2} = \left(\frac{R_x}{R_x + R} - \frac{1}{1 + k} \right) V_{ref} A \quad (1)$$

式中: V_{ref} 为惠斯通电桥供电基准电压, 由低温漂精密基准电压源提供; A 为信号调理电路的放大倍数; R_x 为铂电阻 R_{pt} 的阻值; R 为 R_{11} 阻值; R_2 、 R_3 取值相同, k 为 R_2 、 R_3 阻值与 R_{11} 阻值的比值, 为了提高惠斯通电桥输出电压与电阻变化的线性度, k 取值尽可能大^[16]。同时, 为了消除铂电阻自热效应, 桥臂电阻取值要使流过铂电阻电流不超过 0.5 mA 。电路参数见图 4, 采用低电压测量系统, OP400 使用双电源 $\pm 12 \text{ V}$ 供电; 惠斯通电桥使用 5 V 基准电压供电, V_{ref} 值为 5 ; R_{11} 使用 820Ω 精密电阻, R_2 、 R_3 使用 $20 \text{ k}\Omega$ 电阻, k 值为 24.39 ; 放大倍数 A 值为 37 。

虽然在电路结构和器件选型上采取了减小测量误差和提高线性度的措施, 但由于铂电阻非线性、电缆线阻、电桥非线性、电路寄生电阻和运算放大器的

非理性特性等因素, 测温电路存在测量误差, 且误差随着测温动态范围增大而增加, 需要在测温动态范围内采取误差校正。FPGA 运行速度快, 可以快速对集成的各种功能进行并行处理, 但因为无法直接做浮点运算, 所以智能控温算法多使用 CPU 实现, 需要对智能 PID 控温算法进行改进, 以满足 FPGA 实现。

1.1 基于最小二乘优化两级拟合测温校正

影响黑体测温精度的因素主要有电阻温度转换公式拟合误差、铂电阻测温线阻引起的误差和电路测量误差, 需要对误差进行校正。最小二乘法是常用的误差校正方式^[17], 文中采用分级拟合的方式, 首先对铂电阻与温度的转换公式拟合校正, 再对测量偏差进行系统误差校正, 校正包括导线电阻、电桥非线性、电路寄生电阻和运放的非理性特性等因素引起的测量误差, 对不同拟合方式进行定量化分析。

使用铂电阻分度表拟合电阻和温度公式。为减小铂电阻阻值温度转换公式的拟合偏差, 对铂电阻阻

值 R 和温度估计值 \widehat{T}_i 转换公式采用多项式拟合:

$$\widehat{T}_i = k_n R_i^n + k_{n-1} R_i^{n-1} + \dots + k_0 \quad (2)$$

式中: R_i 为第 i 个标定点的电阻值; $k_0 \sim k_n$ 为多项式系数。基于最小二乘法拟合, 得到多项式系数:

$$\min \sum_{i=1}^M (T_i - \widehat{T}_i)^2 \quad (3)$$

式中: M 为采样点个数; T_i 为第 i 个标定温度值。用均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 来衡量拟合误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (T_i - \widehat{T}_i)^2} \quad (4)$$

比较不同次方多项式拟合的 RMSE 值, RMSE 值越小拟合越优。对系统测量误差也采用最小二乘法校正, 通过 RMSE 值选出最优校正公式。使用精密电阻 $R_{standard}$ 对整个测温范围进行系统误差校正:

$$\widehat{R} = f(R_{measure}) \quad (5)$$

式中: \widehat{R} 为校正后电阻估计值; $R_{measure}$ 为校正前电路测量电阻值, 由公式 (1) 计算求得。使用最小二乘法拟合得到公式 (5) 系数:

$$\min \left(\sum_{i=1}^N [f(R_{measure}^i) - R_{standard}^i]^2 \right) \quad (6)$$

式中: $R_{standard}^i$ 为第 i 个精密电阻值。将公式 (5) 代入公式 (2) 求出校正后温度。

1.2 基于 FPGA 的模糊增量 PID 控温

首先建立黑体控温系统模型, 黑体控温模型可简化为一阶惯性滞后系统, 传递函数近似为^[18]:

$$\frac{G(s)}{u(s)} = \frac{K}{Hs+1} e^{-\tau s} \quad (7)$$

式中: K 为系统放大系数; H 为时间常数; $u(s)$ 为控制量; $G(s)$ 为温度; τ 为系统滞后时间。传递函数与黑体比热容、环境温度、黑体质量和加热功率等因素有关。

选择真空下, 环境温度 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 的测试数据, 使用阶跃响应辨别法^[19-20] 得到星上黑体近似传递函数为:

$$\frac{G(s)}{u(s)} = \frac{0.21633}{367.33s+1} e^{-8s} \quad (8)$$

对于离散系统 PID 控温系统, t 时刻温度偏差 $e(t)$ 为:

$$e(t) = T_{set} - T(t) \quad (9)$$

式中: T_{set} 为设定控温点; $T(t)$ 为 t 时刻 ADC 采集温度值。

经典 PID 算法, t 时刻的控制量 $u(t)$ 为:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \sum_{i=0}^t e(i) + k_d [e(t) - e(t-1)] \quad (10)$$

式中: k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; k_d 为微分系数。 t 时刻控制量的增量 $\Delta u(t)$ 为:

$$\begin{aligned} \Delta u(t) = u(t) - u(t-1) = & k_p [e(t) - e(t-1)] + \\ & k_i e(t) + k_d [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \end{aligned} \quad (11)$$

使用增量 PID 控温方式, t 时刻实际输出控制量为为上一时刻的控制量的增量, 控制量增量与最近三次的温度偏差有关, 不需要计算温度累积误差, 提高了系统控制的稳定性, 且易于计算和 FPGA 实现。

增量 PID 控温没有误差累积, 削弱了积分项的影响, 应用在控温系统时易存在稳态偏差, 因此将模糊控制和增量 PID 控制结合, 根据 t 时刻温差 $e(t)$ 和模糊域 $[\beta, \alpha]$, 对 PID 参数进行整定, 并根据 $e(t)$ 选择不同的控制量输出。为了减少模糊化和解模糊的计算量, 直接使用模糊域划分的区间映射不同的 PID 参数和控制量。

算法流程见图 5。当温差 $e(t) > \alpha$ 时, 只使用比例控制器, 比例系数 k_p 选较大值, 使 PWM 波占空比为 100%, 以提高加热速度, t 时刻输出控制量 $CurU(t)$ 为:

$$CurU(t) = \Delta u(t) = k_p [e(t) - e(t-1)] \quad (12)$$

当温差 $e(t)$ 小于 α 且大于 β , 使用 PID 控制, $CurU(t)$ 为:

$$CurU(t) = \Delta u(t) + CurU(t-1) \quad (13)$$

当温差 $e(t) < \beta$ 时, 输出控制量为 0, 关闭加热, 起到对输出限幅的作用, 防止过冲大。

α 和 β 受黑体惯性滞后影响, 通过调整其值的大小, 既能防止过冲大, 又能提高收敛速度。 α 和 β 的确定方法为经验法, 通过增量 PID 算法和经典 PID 算法确定初始值, α 初始值设定为增量 PID 控温稳态偏差的 1.5 倍, β 值为负, 初始绝对值设定为经典 PID 控温过冲的 30%~50%, 再依据稳态偏差和稳定时间微调。

使用 matlab 进行仿真, 比较经典 PID、增量 PID (Incremental PID, IPID) 和模糊增量 PID 控温 (Fuzzy

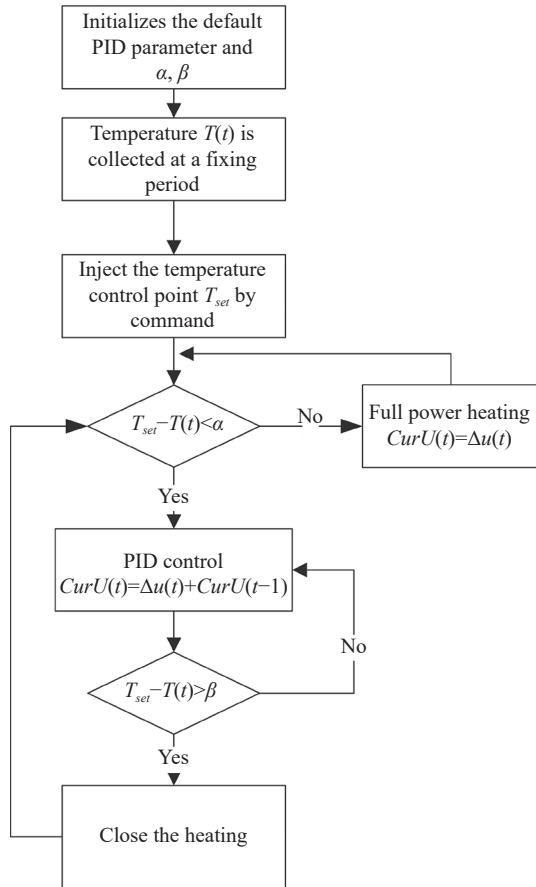


图 5 黑体控温程序流程图

Fig.5 Flowchart of blackbody temperature control

Incremental PID, FIPID) 控温算法在净差、过冲和控温稳定时间等 4 个主要控温指标上的不同。黑体模型见公式 (8), 温度设置 40 °C, 温度响应曲线见图 6。

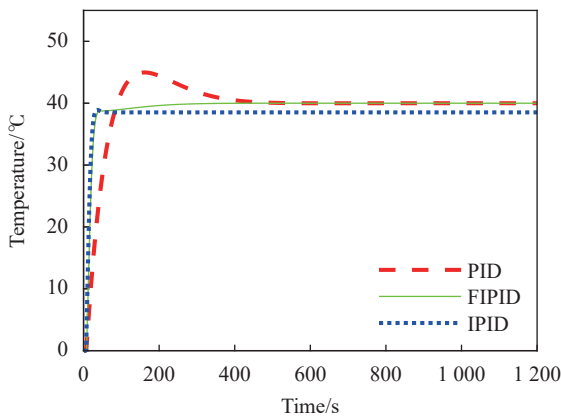


图 6 黑体控温仿真曲线

Fig.6 Blackbody temperature control simulation curve

不同控温算法的控温性能见表 1。IPID 算法收敛速度最快, 但稳态偏差大, PID 和 FIPID 都可以实现

表 1 不同控温算法比较

Tab.1 Comparison of different temperature control algorithms

Control algorithm	Bias/°C	Stabilization time/s	Overshoot/°C
PID	0	1 302	4.97
IPID	-1.767	114	0
FIPID	0	467	0

零稳态偏差, FIPID 收敛速度提高了 64%, 无过冲, PID 算法有 12.4% 的过冲, 因此选择 FIPID 算法进行黑体控温。

2 实验结果与分析

2.1 测温精度实测分析

在 233~373 K 范围内, 间隔 0.1 K 标定铂电阻, 对标定数据分别进行一次、二次和三次多项式拟合, 拟合曲线见图 7, RMSE 比较见表 2。使用二次多项式拟合的 RMSE 值已小于 0.001, 同时为减小公式复杂度, 采用二次多项式拟合, 二次拟合铂电阻阻值和温度转换公式为:

$$\widehat{T}(R) = 9.896e - 06R^2 + 0.234 4R + 30.71 \quad (14)$$

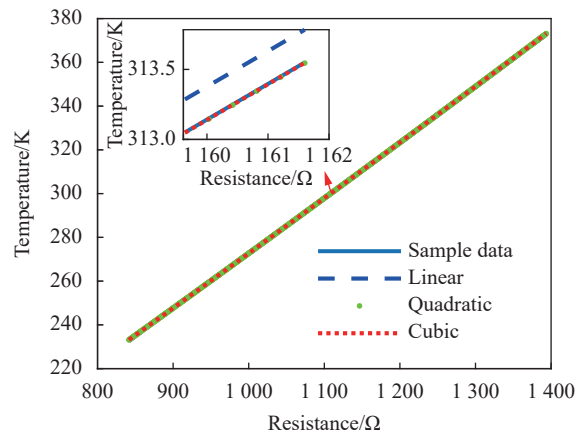


图 7 黑体电阻温度拟合曲线

Fig.7 The fitting curve of blackbody's resistance vs temperature

表 2 不同方法拟合温度 RMSE 比较

Tab.2 Comparison of RMSE of temperature fitted by different methods

Fitting method	RMSE
Linear polynomial	0.018 19
Quadratic polynomial	0.000 77
Cubic polynomial	0.000 77

选用精密电阻对黑体 247~376 K 温度范围进行系统测温精度标定。如表 3 所示,分别比较一次多项式、二次多项式和三次多项式拟合的 RMSE 值,二次多项式拟合 RMSE 最小,采用二次多项式校正,校正后电阻值 \widehat{R} 为:

$$\widehat{R} = 2.915e - 06R_{measure}^2 + 0.997R_{measure} + 0.1016 \quad (15)$$

表 3 不同方法拟合测量电阻 RMSE 比较

Tab.3 Comparison of RMSE of resistance fitted by different methods

Fitting method	RMSE
Linear polynomial	0.0975
Quadratic polynomial	0.0692
Cubic polynomial	0.0721

校正前铂电阻测量值 $R_{measure}$ 由公式 (1) 计算得到,由公式 (15) 得到校正后电阻值 \widehat{R} ,则校正后系统测温精度 $T_{accuracy}$ 为:

$$T_{accuracy} = \widehat{T}(R_{standard}) - \widehat{T}(\widehat{R}) \quad (16)$$

校正前系统测温精度 T_{before} 为:

$$T_{accuracy} = \widehat{T}(R_{standard}) - \widehat{T}(R_{measure}) \quad (17)$$

247~376 K 范围内测温精度如表 4 所示。校正前测温精度为 0.383 K,校正后为 0.035 K,测温精度提高了 90.9%。

表 4 黑体测温系统精度

Tab.4 Accuracy of blackbody temperature measurement system

$R_{standard}/\Omega$	$R_{measure}/\Omega$	\widehat{R}/Ω	T_{before}/K	$T_{accuracy}/K$
900	900.271	900.034	-0.068	0.009
1000	1000.065	1000.082	-0.016	0.021
1050	1049.809	1049.974	0.048	-0.007
1100	1099.789	1100.117	0.054	0.030
1150	1149.564	1150.069	0.111	0.018
1200	1199.426	1200.122	0.147	0.032
1250	1249.076	1249.978	0.237	-0.006
1300	1298.960	1300.083	0.268	0.022
1350	1348.627	1349.985	0.355	-0.004
1400	1398.527	1400.134	0.383	0.035

2.2 控温性能实测分析

黑体控温由 FPGA 实现, FPGA 选择 ACTEL 公司

抗单粒子效应的反熔丝产品 AX2000-CQ352, 软件使用 Verilog HDL 语言编写, 黑体温度采样周期为 2 ms, 控温周期为 30 ms, 控温采用 FIPID 算法。通过地面热真空试验和在轨测试对 FIPID 算法的控温精度、稳定时间、过冲和稳态偏差等 4 个指标进行测试。

地面热真空试验黑体安装在相机光路中, 真空罐通液氮模拟 4 K 冷空间, 真空罐内安装加热灯阵模拟相机在轨外热流变化。通过注数指令由低温到高温设置黑体控温点, 每 32 s 选取一个黑体温度, 整个升温过程曲线如图 8 所示。

控温性能见表 5。在 256~367 K 范围内, 控温精

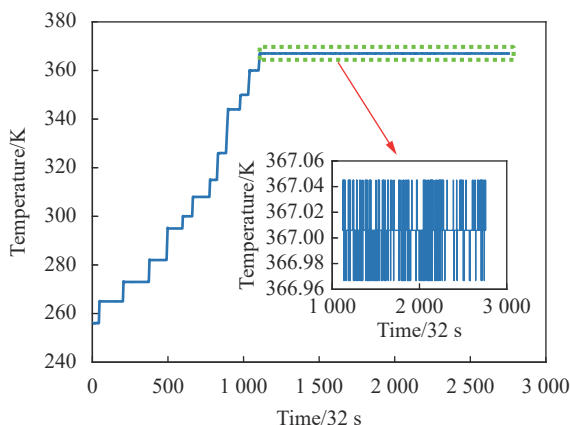


图 8 黑体热真空试验控温曲线

Fig.8 Blackbody temperature control curve in thermal vacuum test

表 5 黑体热真空试验控温测试

Tab.5 Blackbody temperature control in thermal vacuum test

Set point/K	Stabilization time/min	Overshoot/K	Control accuracy/K	Bias/K
256	-	-	0.036	-0.008
265	3	0.170	0.037	0.013
273	4	0.249	0.037	0.009
282	5	0.300	0.037	-0.003
295	7	0.292	0.037	0.007
300	4	0.012	0.038	-0.012
308	6	0.024	0.038	0.013
315	6	0.171	0.038	0.018
326	7	0.014	0.038	-0.014
344	11	0.031	0.039	0.008
350	6	0	0.039	0.006
360	9	0	0.039	0.001
367	8	0.006	0.039	-0.006

度 0.039 K, 稳态偏差不超过 0.018 K, 过冲不超过 0.3 K。温度越高温度波动越大, 选择 367 K 测试 1.5 h 观察控温稳定性, 黑体温度稳定点为 367.006 K, 最大值为 367.045 K, 最小值为 366.967 K, 标准差为 0.013 K, 控温稳定度为 ± 0.039 K。

在轨对黑体控温性能进行测试, 依次注入 268 K、273 K、290 K、295 K、315 K、334 K 和 350 K 等 7 个控温点进行在轨黑体辐射定标, 黑体温度下传周期为 32 s, 取一个温度点, 控温曲线如图 9 所示。

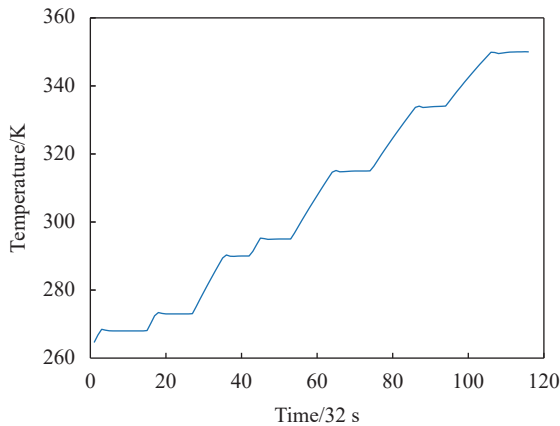


图 9 黑体在轨控温曲线

Fig.9 Blackbody temperature curve in orbit

各控温点控温性能如表 6 所示。在 268~350 K 控温范围内, 过冲不超过 0.469 K, 控温精度为 0.039 K, 稳态偏差不超过 0.013 K, 温升 10 K 稳定时间不超过 10 min, 满足红外相机在轨辐射定标要求。

表 6 黑体在轨控温

Tab.6 Blackbody temperature control in orbit

Set point/K	Stabilization time/min	Overshoot/K	Control accuracy/K	Bias/K
268	4	0.469	0.037	-0.008
273	3	0.393	0.037	-0.012
290	7	0.312	0.037	0.006
295	3	0.274	0.038	0.012
315	8	0.139	0.038	-0.013
334	9	0.046	0.039	0.008
350	10	0.013	0.039	0.013

3 结 论

黑体是红外相机在轨实时定标的常用方式, 随着

航天红外技术向高量化发展, 对黑体测控温精度提出了更高的要求, 同时传统的以 CPU 或 DSP 为控制单元的 PID 控温不适合用于航天器温控系统集成化设计, 文中设计了一种基于 FPGA 的星上黑体高精度集成化温控系统。黑体测温校正使用最小二乘法, 对铂电阻阻值温度公式和系统测温精度进行两级拟合校正, 通过比较 RMSE 选择最佳的拟合方式, 提高测温精度, 实测校正后系统测温精度在 247~375 K 范围内达到 0.035 K, 比校正前提高了 90.9%; 控温采用模糊增量 PID 控温方式, 通过仿真分析 PID、增量 PID 和模糊增量 PID 等三种控温算法, 模糊增量 PID, 模糊增量 PID 可以实现零稳态偏差, 零过冲, 收敛速度比 PID 控温提高了 64%。对设计的测控温系统进行软硬件实现, 控制芯片选用 ACTEL 公司的反熔丝 FPGA, 除黑体控温功能外, 还集成了 1553 B 测控通信、138 路测温 and 108 路控温等功能, 实现了高集成化设计。通过地面热真空试验和红外相机在轨测试, 256~367 K 范围内控温精度 0.039 K, 稳态偏差不超过 0.018 K, 温升 10 K 稳定时间不超过 10 min, 满足星上高精度辐射定标的要求。系统具有测控温精度高、动态范围大、易于集成化的优点, 可推广应用于星上其他高精度主动温控。

参考文献:

- [1] Zhang Y. Study on Thermal infrared remote sensors' absolutely radiometric calibrations [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [2] Wang Y D. On-orbit radiometric calibration method for gaze camera with large planar array [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [3] Xu N, Chen L, Hu X Q, et al. Nonlinearity of FY-2D infrared detector in thermal window channels and its correction method [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(4): 337-343. (in Chinese)
- [4] Barsi J A, Schott J R, Hook S J, et al. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 11607-11626.
- [5] Feng X, Li L B, Chen B Y, et al. Post-launch calibration and validation of the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GII-RS) on FY-4 A [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(5): 648-654. (in Chinese)

- [6] Chen M W, Qi H X, Gong Y M, et al. Analysis of effect of calibration blackbody temperature stability on the infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 652-654. (in Chinese)
- [7] Xin X J. High precision temperature control information acquisition and processing technology for infrared radiation reference satellites[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [8] Zhang H, Dai J M. Design and implementation of the temperature controlling system for a surface blackbody radiant source [J]. *Electric Machines and Control*, 2006, 10(5): 526-530. (in Chinese)
- [9] Morozova S P, Parfentiev N A, Lisiansky B E, et al. Vacuum variable medium temperature blackbody [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2010, 31(8-9): 1809-1820.
- [10] Zhang K F, Jiang T, Shao L, et al. Research on precision temperature control of laser diode based on the novel fuzzy-PID control unit [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2017, 25(3): 648-655. (in Chinese)
- [11] Wang Z, Wang L, Yun Z, et al. Temperature control based on Fuzzy-PID algorithm for the blackbody radiation source[C]//2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2018.
- [12] Guo J C, Li F Y, Chen A R, et al. Automatic temperature control design for thermal vacuum tests based on fuzzy PID control[C]//2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2 MSE), 2019.
- [13] Zhan H, Yu S, Liu D, et al. Adaptive neural network PID controller design for temperature control in vacuum thermal tests[C]//2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2016.
- [14] Yun Z R, Wang Z G, Wang J H. Temperature control system for blackbody radiation source based on ADRC [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(3): 232-238. (in Chinese)
- [15] Fu C, Tan W. Control of unstable processes with time delays via ADRC [J]. *ISA transactions*, 2017, 71: 530-541.
- [16] Li Y X, Zhang R, Liu Y N. Design of high accurate and reliability measure temperature circuit for blackbody on the track [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2005(9): 3433-3454. (in Chinese)
- [17] Wang J J, Zhang W. An implementation of least square method for temperature measurement of a platinum thermistor with unbalanced voltmeter bridge [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1999(5): 35-36. (in Chinese)
- [18] Shao L, Liu C, Wang Z, et al. The temperature control of blackbody radiation source based on IMC-PID[C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2019: 1698-1702.
- [19] Zhang H D. Blackbody temperature control based on adaptive double output function of PID self-tuning [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(12): 1-9. (in Chinese)
- [20] Ahmed S, Huang B, Shah S L. Identification from step responses with transient initial conditions [J]. *Journal of Process Control*, 2008, 18(2): 121-130.

Design of high-precision integrated temperature control system of spaceborne blackbody

Hei Huage^{1,2}, Li Xiaoyan^{3*}, Li Lufang^{1,2}, Cai Ping¹, Chen Fansheng^{1,3}

(1. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

Abstract:

Objective As space infrared technology advances towards high quantification, higher requirements are demanded for the precision of blackbody temperature control. Simultaneously, as spacecraft functionality becomes more complex, integrated design is necessary to reduce power consumption and weight. Traditional blackbody temperature control systems based on CPU or DSP are unable to meet the demands of high integration and high precision. To address this issue, this paper presents the design of a high-precision temperature control system for on-board blackbodies based on FPGA.

Methods Temperature acquisition and control are performed using an FPGA as the core control unit, enabling multifunctional high-speed parallel processing. The blackbody temperature measurement module adopts a three-wire Wheatstone bridge to minimize the influence of wire resistance. In the signal conditioning section, a three-stage active filtering and amplification, composed of integrated operational amplifiers, is employed to achieve low-noise amplification of the electrical output. Compared to traditional instrumentation amplifiers combined with passive filtering, this method exhibits stronger interference suppression capabilities. Additionally, to address the non-linear error between platinum resistor resistance and temperature, as well as circuit errors in the temperature measurement system, a hierarchical fitting correction method based on polynomial models and least squares theory is proposed to further improve temperature measurement accuracy. The temperature control module incorporates a novel fuzzy control and incremental PID (FIPID) combination to reduce overshoot, accelerate convergence speed, and achieve high-precision temperature control.

Results and Discussions Based on the measurement results using precision standard resistors, the temperature measurement accuracy of the system within the range of 247-375 K is 0.035 K, which is a 90.9% improvement compared to the uncorrected accuracy of 0.383 K (Tab.4). Temperature control simulation experiments demonstrate that compared to PID control, the FIPID algorithm achieves zero overshoot, while the PID algorithm has a 12.4% overshoot. Furthermore, the FIPID algorithm exhibits a 64% improvement in convergence speed (Fig.6). Ground thermal vacuum and on-orbit temperature control experiments indicate that the measured temperature control accuracy within the range of 256-367 K is 0.039 K, with a steady-state deviation not exceeding 0.018 K, and a temperature rise stabilization time of less than 10 minutes for a 10 K increase (Tab.5-6).

Conclusions Traditional blackbody temperature control systems based on CPU or DSP cannot meet the requirements for high integration and high precision. To address this issue, this paper presents the design of a high-precision integrated temperature control system for on-board blackbodies based on FPGA. The approach uses a three-wire Wheatstone bridge to minimize the influence of wire resistance and introduces three-stage active

filtering and amplification to improve the system's interference suppression capabilities. To mitigate temperature measurement errors, a hierarchical fitting correction method based on polynomial models and least squares theory is proposed. Additionally, a novel fuzzy control PID temperature control algorithm is introduced in the temperature control module to achieve high-precision temperature control. Experimental results demonstrate that the temperature measurement accuracy of the system is 0.035 K, which is a 90.9% improvement compared to the pre-optimized accuracy. Temperature control simulation experiments show that this method achieves a 64% improvement in convergence speed compared to traditional PID control, with zero overshoot, while the PID algorithm exhibits a 12.4% overshoot. Ground thermal vacuum and on-orbit temperature control experiments indicate that the measured temperature control accuracy within the range of 256-367 K is 0.039 K, meeting the requirements for on-orbit high-precision calibration and high integration. The system has been successfully applied to an on-orbit infrared camera of a specific model. The system possesses the advantages of high temperature measurement and control accuracy, wide dynamic range, and ease of integration, making it suitable for widespread application in other high-precision active temperature control systems in space.

Key words: spaceborne blackbody; integrated design; FPGA; high-precision temperature measurement and control; fuzzy incremental PID

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (61975222)