

# 一种轻小型遥感相机高精度主动热控设计

常霞, 张鹏, 李恺, 史翠红, 孙琼阁

(北京空间机电研究所, 100094)

**摘要:** 轻小卫星的集成化、紧凑化和小型化设计理念使得卫星散热困难, 迫切需要高效率、高可靠、低成本的热控分系统, 来控制卫星内部的热控过程; 介绍了一种分布式测温控温装置, 在航天相机的主体和镜头的温度监测中使用, 可为相机主体和镜头温度控制的提供参数, 通过高精度测温 and PID 控温, 实现对相机工作环境温度实时控制, 克服了传统热控方式的体积大、精度低、可靠性差缺点, 非常适用于轻小型遥感相机。

**关键词:** 分布式测温控制; 校准电阻; 补偿校正; 积分分离 PID; PWM

## Design of High Precision Control of Space Camera Temperature Controlling

Chang Xia, Zhang Peng, Li Kai, Shi Cuihong, Sun Qiongg

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In the orbiting environment, the thermal environment changing of optical system will affect the quality of Remote Sensing image, so it is very important to control thermal environment of Space Remote Sensing Camera for its normal work. For making sure the Space Camera working temperature is stably and reliably, this article gives a scheme that management function and thermal controlling module are controlled by DSP in space camera, which thermal controlling way apply a intergral - separation PID algorithm. It demonstrated that this means could be applied in engineering with laboratory equipment, and have a control accuracy of 0.3degree Celsius. This system overcome the low-precision characteristics of traditional temperature control.

**Keywords:** temperature controlling; calibrate resistance; intergral separation PID; arithmetic compensative amending; PWM

### 0 引言

轻小卫星具有功能密度高、灵活性强和研制周期短等优势, 成为目前航天技术领域的三大研究热点与发展前沿之一。然而, 轻小卫星紧凑化和小型化设计理念对微小卫星热控系统的设计提出了新的挑战。针对轻小卫星热控器件的最新设计思想和热系统的自主控制策略理念, 本文研究了一种轻小卫星主动热控系统的设计。系统 AD 转换采用了 AD 转换芯片 ADC128S102, 其为 8 通道多路选择输入, 集成了模拟开关、采集、12 bit 量化功能, 配置和数据传送都通过 SPI 接口完成, 中央处理单元采用 DSP TMS320F240, 其上有专门的集成 PWM 技术并且自带 SPI 接口, 可和 AD 转换装置直接通讯, 该系统规模小, 供电简单, 集成度高, 非常适用于轻小卫星控温。通过对相机各个控温回路高精度测量, 温度数据校正拟合, 积分分离 PID 控制, 实现了全数字化的温度闭环控制, 非常适合于轻小型相机控温实现。

### 1 分布式测温装置

以往分布式测温装置由热敏电阻、分压电路、模拟开关、放大器、A/D 转换器、中央处理单元(单片机)组成, 如图 1 所示。来自相机主体和镜头的热敏电阻阻值通过分压电路转换为电压值, 经模拟开关选通后, 由放大器放大, 然后经过 A/D 转换器采集、量化后通过数据总线传送给

中央处理单元。电路规模大、需要使用 ±12 V 供电, 数据线并行传输, 电路较为复杂, 供电要求高, 功耗和体积大。系统采用轻小卫星热控器件 ADC128S102, 用分布式测温装置, 对传统的相机温控系统进行了改进。由热敏电阻、分压电路、基准电压电路、校准电阻、A/D 转换电路、中央处理单元组成。热敏电阻分布在各测温点将温度值转换为电阻值, 分压电路和基准电压电路将热敏电阻阻值转换为电压值, A/D 转换电路将电压值采样、量化并通过 SPI 总线发送给中央处理单元 DSP, 校准电路提供两路基准值, 校正 A/D 采集的比例系数和零偏, 中央处理单元将电压值解析还原成温度值并根据校准模块提供的基准值校准。中央处理单元运算处理控制加热片, 实现对系统的温度控制。适用于轻小型相机测温装置, 见图 1。

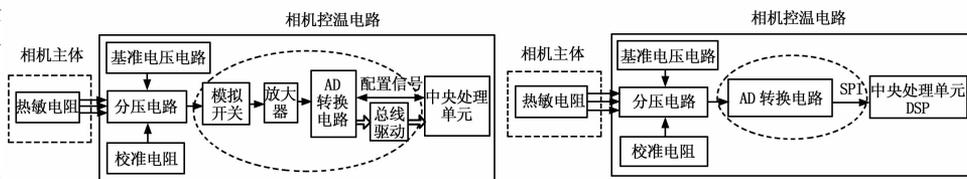


图 1 传统装置(左)与适用于轻小型相机测温装置(右)

### 2 精密测温调理设计

测温电路中设计了图 2 所示的测温电路来实现对温度值的精密测量。系统为热敏电阻(图中  $R_x$ ) 提供偏置电源, 相机在轨正常工作时,  $R_x$  一般为 2~15 kΩ。为减小敏感元件工作电流, 避免因自身发热导致的采集误差, 我们将采集回路串联一个 10 kΩ 的精密电阻 ( $R_0$ ), 保证测量回路电流也能保证在

收稿日期: 2014-03-14; 修回日期: 2014-04-14。

作者简介: 常霞(1986-), 女, 山西人, 工学硕士, 工程师, 主要从事宇航空间遥感控制和测试技术的软件方向的研究。

mA 级以下。测温回路在中央处理单元 SPI 口的输出电路控制下, 选通相应热敏测量通道, 输入高精度 AD 转换芯片 ADC128S102, 得到当前温敏电阻上的电压数据。

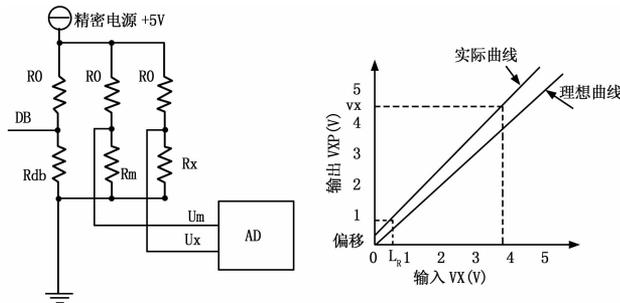


图 2 精密测温补偿校准原理图

由于从热敏电阻安装点 (相机主体) 到阻值测量点 (ADC128S102) 之间需经长线电缆传输, 同时由于环境和温度变化, 不可避免的将 AD 的零点漂移和基准恒压源中运放等元件的参数变化, 从而导致 AD 输出和放大倍数的漂移。因此, 系统中设计了标准精密电阻通道来减小干扰对测量值的影响。增益误差和偏移误差是采样通道所固有的, 增益误差是指从 0~5 V 输入时实际斜率与理想斜率之差, 偏移误差是指对 AD 转换器采用零伏差动输入时实际代码与理想代码之间的差异, 是零伏差动输入的截取误差。系统中通过辨识校正来减小增益误差和偏移误差。如下: 选取 ADC 芯片的通道 1, 2 作为高精度温度测量  $R_1$ 、 $R_2$  参考标准回路, 读取相应的结果寄存器, 获得转换值, 利用两组输入输出值求得 ADC 模块的校正增益和校正偏移, 其推导公式与精密测温补偿公式相似, 然后利用校正后的增益值和偏移值对其它通道的转换数据进行补偿, 从而提高 ADC 模块转换的准确度。

推导出的增益和偏移校正公式:

$$V_{mc} = V_{1s} + (V_m - V_1) * (V_{2s} - V_{1s}) / (V_2 - V_1) \quad (5)$$

式中,  $U_m$ 、 $V_2$ 、 $V_1$  为实测结果,  $V_{1s}$ 、 $V_{2s}$  为标准回路  $R_0$ 、 $R_1$  电压测量值,  $V_{mc}$  为校正后的待测电压值。对比测温校正公式与增益和偏移校正公式可知, 两个校正公式可以在程序中用统一的校正公式进行校正, 分别对温度测量环节和转换环节进行误差补偿, 提高的系统采集和转换的精度。

$R_m$ 、 $R_{db}$  回路为两个标准电阻通道,  $R_{db}$  回路中, 电阻  $R_{db}$  的阻值选择需小于当前测温范围内热敏电阻的最小值;  $R_m$  回路中, 电阻  $R_m$  的电压值作为标准采集回路。DSP 电路在每次采集当前待测  $R_x$  回路电阻分压值之前, 首先分别采集  $R_{db}$  回路和  $R_m$  回路电阻分压, 采集结果用作当前  $R_x$  回路电压值的修正系数, 通过此设计排除系统在长期工作环境和温度影响下导致的恒压源输出和放大倍数的漂移, 同时很好的排除因长线传输为系统带来的测量误差。

对于每一个电阻测量通道, 分压测量值如表 1 所示。

表 1 电阻理想分压与实际分压测量计算

分压测量值	分压计算公式	备注
理想分压测量值	$U_{mc} = K_s E_s \frac{R_x}{R_0 + R_x}$	$E_s$ 、 $K_s$ 为基准恒压源和放大倍数标称值, $E$ 、 $K$ 为实际电压值和实际放大倍数, $V_0$ 为放大器输入端零漂
实际分压测量值	$U_m = V_0 K + K E \frac{R_x}{R_0 + R_x}$	

因此, 对于  $R_1$ 、 $R_2$  标准电阻回路, 分压测量值如表 2 所示。

由上述理想分压测量公式可知:

$$V_{2s} - V_{1s} = E_s K_s \left( \frac{R_2}{R_0 + R_2} - \frac{R_1}{R_0 + R_1} \right) \quad (1)$$

由实际分压测量公式可知:

$$V_2 - V_1 = E K \left( \frac{R_2}{R_0 + R_2} - \frac{R_1}{R_0 + R_1} \right) \quad (2)$$

则:

$$E_s K_s = E K \left( \frac{V_{2s} - V_{1s}}{V_2 - V_1} \right) \quad (3)$$

推导出校正公式:

$$U_{mc} = V_{1s} + (U_m - V_1) \left( \frac{V_{2s} - V_{1s}}{V_2 - V_1} \right) \quad (4)$$

式中,  $U_m$ 、 $V_2$ 、 $V_1$  为实测结果,  $V_{1s}$ 、 $V_{2s}$  为标准值, 由推导结果可知, 补偿运算的结果完全抵消了  $E$ 、 $K$ 、 $V_0$ 。

### 3 增益误差和偏移误差处理

将热敏电阻和串联电阻的分压值送往 12 位 AD 转换装置 ADC128S102 芯片, 其为 12 位转换精度, 最高采样 1 MHz, 模拟输入为 0~5 V, 是可编程 8 通道多路选择 ADC, 通过 DSP 的 SPI 口编程自由切换测温通道, 对于多回路测温应用特性来说集成度非常强。ADC128S102 芯片读写时序如图 3 所示。通过 DIN 与 DSP 的 SPI 口连接, 编程选择输入通道, 取得 DOUT 管脚相应通路的测温回路量化值。系统测温范围 (-20~+60) 对应 0~5 V 的电压区间, 测温分辨率为  $80/4096 = 0.02$  K。

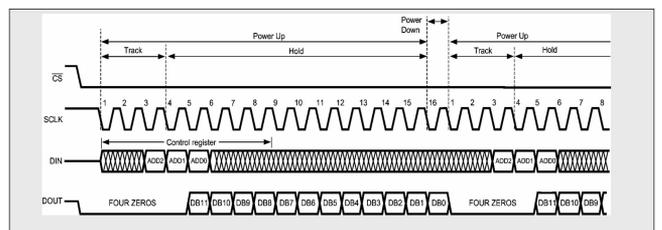


图 3 ADC128S102 芯片读写时序图

表 2  $R_1$ 、 $R_2$  标准电阻回路理想分压与实际分压测量计算

电阻回路	理想分压测量公式	理想分压测量公式	备注
$R_1$ 标准电阻回路	$V_{1s} = K_s E_s \frac{R_1}{R_0 + R_1}$	$V_1 = V_0 K + K E \frac{R_1}{R_0 + R_1}$	$E_s$ 、 $K_s$ 为基准恒压源和放大倍数标称值, $E$ 、 $K$ 为实际电压值和实际放大倍数, $V_0$ 为放大器输入端零漂
$R_2$ 标准电阻回路	$V_{2s} = K_s E_s \frac{R_2}{R_0 + R_2}$	$V_2 = V_0 K + K E \frac{R_2}{R_0 + R_2}$	

### 4 R-U 公式拟合与温度解算

采集得到的热敏电阻的分压值，经过线性插值拟合 R-U 公式计算出热敏电阻的阻值，并通过 T-R 计算得到热敏电阻温度值。

当前转换的 AD 电压测量值  $U_x$ ，根据 R-U 公式计算得到的电阻值  $R_x$ ，再根据 T-R 公式计算出温度测量值  $t_x$ 。R-U 公式根据实际测量结果对比进行了多项式多阶拟合，实现测试中表明，5 阶多项式拟合精度最高，误差最小。

R-U 公式：

$$R_x = a_0 * U_x^5 + a_1 * U_x^4 + a_2 * U_x^3 + a_4 * U_x^2 + a_5 * U_x + a_6$$

式中， $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  根据每路在热敏电阻的不同温度点对应的电压值，用五次多项式拟合出的系数，拟合曲线误差见图 4。根据热敏电阻的阻值与温度之间的 T-R 公式最终计算出温度：

T-R 公式：

$$t = \frac{2c}{-b + \sqrt{b^2 - 4c(a - \ln R)}} - 273.15 \quad (6)$$

式中， $t$  为温度 (°C)； $R$  为电阻 ( $\Omega$ )； $a, b, c$  为热敏电阻系数

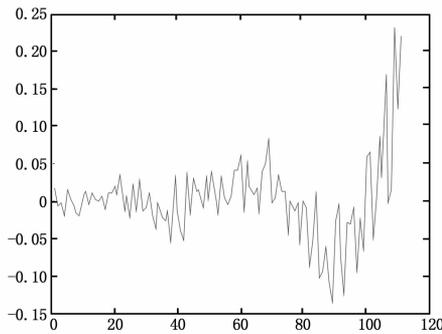


图 4 R-U 五次多项式拟合曲线误差

(上接第 2269 页)

### 5.2 下一步研究方向

可从两方面继续开展研究：(1) 在现有平台下实现 IEEE 802.11g/n 协议标准<sup>[13]</sup>，实现更高移动计算能力；(2) 在中标麒麟等 Linux 版本的内核中完善相应驱动及上层应用，进一步推动移动计算领域关键技术的自主能力。

参考文献：

[1] 刘乃安. 无线局域网 (WLAN) 原理、技术与应用 [M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2004.

[2] 金 纯，陈林星，杨吉云. IEEE 802.11 无线局域网 [M]. 北京：电子工业出版社，2004.

[3] IEEE P802.11n, part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; Enhancements for Higher ThroughPut [Z], Feb, 2007.

[4] 中国科学院计算机技术研究所. Loongson3A 用户手册 (V1. 7) [Z]. 北京：中国科学院计算机技术研究所，2011.

[5] 苏培培，李士刚. 基于龙芯 2F 的便携机主板设计技术研究及实现

### 5 积分分离式 PID 控制

相机温度控制算法采用积分分离式 PID 控制。设定一个积分阈值  $\epsilon$ ，当温度偏差的绝对值在  $\epsilon$  范围外时，屏蔽积分作用，采用 PD 控制；当温度偏差的绝对值在范围  $\epsilon$  内时，开启积分作用，采用 PID 控制。分环节消除了系统静差，提高控制精度，微分环节可以对系统的偏差的变化趋势作出预测，加快改善系统品质，系统对测量的温度信号进行了 64 次均值滤波和滞后滤波，提高信噪比。对加热片的加热功率控制采用 PWM 技术，由上述控制算法得到的位置式 PID 算式控制量作为输出，直接改变加热片通断占空比，从而可实现对温度的闭环连续控制。使 PID 算式输出控制量与电热管通电时间成正比，即可实现加热功率的连续调节。采用 DSP TMS320F240 输出 PWM 波，PWM 波的载波由 DSP 的定时器触发，载波周期为控温步长，每次定时时间，CPU 都进入中断服务子程序，在中端服务子程序中 CPU 计算出每个控温回路 PWM 脉冲需要的占空比，生成了连续的 PWM 波对加热片进行控制。

### 6 结束语

分布式测温装置具有集成度高、精度高、功耗低等优点。本文采用 DSP 作为温度测量与控制器的核心，同时采用 ADC128S102 作为温度转换器件，系统集成度显著提高，大量减少元器件，抗干扰能力增强，可靠性得到很大改善。数字化、模块化的设计使得系统的适用性更好，相关的控制算法更易实现，非常适合于应用于轻小型星载相机控温的实现。

参考文献：

[1] 李国强，姚根和. 中国星载 CCD 相机控温仪性能比较 [J]. 航天返回与遥感，2006，27 (4)：45-48.

[2] 陈世平. 空间相机设计与试验 [M]. 北京：宇航出版社，2003.

[3] 李 娟，梁夫彧，栗 欣. 浅谈地球同步卫星温控系统的管理 [J]. 中国航天，2006，(1)：23-25.

[4] 闵桂荣，郭舜著. 航天器热控制 [M]. 北京：科学出版社，1998.

[J]. 计算机测量与控制，2012，(2)：435-437.

[6] 蔡兴建. 基于 IBIS 模型的高速电路信号完整性研究 [D]. 上海：上海交通大学，2000.

[7] 江苏中科龙梦科技有限公司. PMON 手册. Revision 0.1 [Z]. 南京：江苏中科龙梦科技有限公司，2009.

[8] 韩山秀，樊晓樾，张盛兵等. BIOS 的设计与实现 [J]. 微电子学与计算机，2005，22 (11)，113-115.

[9] 张菊莉，张君毅，孟小锁. 基于龙芯 2F 架构的 PMON 分析与优化 [J]. 现代电子技术，2011，(34)，19-21.

[10] 徐恒阳. 龙芯多核平台上性能分析工具的设计与实现 [D]. 合肥：中国科学技术大学，2011.

[11] 郭利财，刘燕君. 龙芯 3A 处理器上 FFT 的高效实现 [J]. 小型微型计算机系统，2012，(3)，594-597.

[12] 王 雷，樊晓樾，王党辉. 龙芯 3A 平台 Vxworks 移植的研究和实现 [J]. 微电子学与计算机，2012，(2)，86-90.

[13] 牛 伟，郭世泽，吴志军. 无线局域网 [M]. 北京：人民邮电出版社，2003.