

文章编号 1004-924X(2019)11-2315-06

## 红外探测器星上大范围高分辨率测温系统

黄良<sup>1,2</sup>, 李明轩<sup>1,2</sup>, 吕恒毅<sup>1</sup>, 李祥之<sup>1</sup>, 韩诚山<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为实现红外探测器星上大范围高分辨率测温从而提升温度控制的稳定性和成像质量,针对传统测温系统不能兼顾大范围与高分辨率两种特性的缺点,研究设计了红外探测器星上温度测量系统。通过全温区分档以及档位自动切换功能实现大范围、高分辨率的温度测量。实验结果表明,该红外探测器星上温度测量系统对星上70~260 K的大范围温度进行测量,测量分辨率平均为9.1 mK/码,最高可达7.6 mK/码,较以往的测温系统分辨率提升了一个量级,满足红外探测器的星上测温要求。

**关键词:**红外探测器;温度测量;高分辨率;档位自动切换

中图分类号:TN215;TP273 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192711.2315

## Large-range and high-resolution temperature measurement system for satellite-borne infrared detector

HUANG Liang<sup>1,2</sup>, LI Ming-xuan<sup>1,2</sup>, LÜ Heng-yi<sup>1</sup>, LI Xiang-zhi<sup>1</sup>, HAN Cheng-shan<sup>1\*</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: hancs@163.com*

**Abstract:** In order to realize the high temperature resolution measurement for the satellite-borne infrared detector to further realize the stability of temperature control, the imaging quality of a remote sensing infrared camera is improved. Aiming at the shortcoming that the traditional temperature measuring system cannot take into account wide range and high-resolution characteristics, the temperature measurement system for the infrared detector is designed, and wide range and high-resolution temperature measurements are realized by subdividing the whole temperature area and the automatic switching function of the temperature zone. The experimental results show that the infrared detector temperature measurement system can measure the wide range of 70-260 K with measurement resolution as high as 7.6 mK/code compared with the previous temperature measurement system for improved magnitude, and to meet the requirements of satellite-borne infrared detector temperature measurement.

收稿日期:2019-04-04;修订日期:2019-05-05.

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(No. 2016YFB0500100);国家自然科学基金资助项目(No. 11873007)

**Key words:** infrared detector; temperature measurement; high resolution; automatic switching

## 1 引言

红外相机用于采集红外谱段的图像,反演观测目标的温度特性,因此在森林火灾监测、农作物生长观测、数字天气预报、全球碳平衡等民用领域以及夜间对地侦察监视、识别伪装等军用领域有着广阔的应用前景。由于红外图像反映的是目标的温度信息,所以在轨红外探测器对地观测时,探测器的工作温度对所采集到的红外图像质量有着极大的影响<sup>[1-2]</sup>。为了减小自身温度对观测目标信息的干扰,需要对红外探测器星上工作温度进行稳定控制。控温的关键前提就是温度的高分辨率实时测量。

近年来,不同类型的温度测量系统得到实现。张亮<sup>[3]</sup>、赵博宏<sup>[4]</sup>等设计的宽范围测温电路针对工业生产中的温度测量,实现了对 $-55\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区的测量,对温度测量系统的测温范围进行了改进,但没有关注分辨率特性。李聪明<sup>[5]</sup>设计的非接触式红外测温系统仅能达到 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的测温分辨率,关注的重点是消弭接触式测温带来的温度漂移。Y. Xianjun<sup>[6]</sup>、郝小鹏<sup>[7]</sup>、胡鹏程<sup>[8]</sup>及朱均超<sup>[9]</sup>等则是利用铂电阻电桥测温系统对温度进行测量,前两者实现了 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度测量分辨率,后两者分别实现了 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度测量分辨率,他们采用的方法大致相同,而出现分辨率结果不同的原因在于后两者使用了 24 位的 AD 转换器。肖薇等<sup>[10]</sup>设计的测温系统实现对 $-55\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温区的测量,且系统分辨率达 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但这种方法的测温范围和分辨率不能较好地适用于航天领域的星上应用。陈李<sup>[11]</sup>等设计的精密温度控制系统中实现了 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、分辨率达 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度测量,相较于其他方法,在测温分辨率上的提升是较为明显的,但是分辨率仍不适用于航天领域的应用场景。杜帅帅等<sup>[12]</sup>设计的温度测量系统能够将误差减小到 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但温度测量范围和分辨率有限。T. Liao<sup>[13]</sup>等设计的温度传感器能够在恶劣的航空环境下实现 $0.095\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高精度测量,但是温度测量范围有限。现有的

温度测量系统多应用在工业测温领域,工业测温领域对温度测量的分辨率与量程往往要求不高,不能较好地满足红外探测器星上温度测量系统 $70\sim 260\text{ K}$ 的温度量程与 $10\text{ mK}$ 温度分辨率的要求。目前,对于星上红外探测器的大范围高分辨率测温方法暂未见报道。

红外探测器星上所需的测温范围为 $70\sim 260\text{ K}$ , $N$ 为 AD 转换器的位数,若要实现 $10\text{ mK}$ 的温度测量分辨率,至少需要位数为 15 bit 的 AD 转换器,而在宇航级器件中,位数 12 bit 以上的 AD 转换器存在很高的获取难度。本文研究了具有全温区分档以及档位自动切换功能的红外探测器星上温度测量系统,以低位数的 AD 转换器实现大范围高分辨率测温。在保证所测量温度跨度大的同时,也能满足高分辨率的温度测量要求。该系统具有大范围量程、高分辨率量化、实时性好、可靠性高、操作简单等特点。

## 2 全温区分档及档位自动切换原理

星载红外探测器工作温度的稳定性直接影响到红外成像质量,而测温分辨率是决定控温稳定性的关键指标。目前,为了提高星上控温系统的稳定性,测温系统的分辨率需要达到 $10\text{ mK}$ 甚至更高,给大范围控温系统的实现带来难度。

### 2.1 方法原理

为了以低位数的 AD 转换器实现大范围温度的高分辨率量化,提出了全温区分档以及档位自动切换的方法。

图 1 为红外探测器星上温度测量系统组成图。该系统由五部分组成:温度模块、信号放大模块、数据处理模块、温度量化模块和偏置切换模块(DA 转换器)。温度转换模块由温敏元件与恒流源电路组成,恒流源电路为温敏元件提供恒定电流,将温度信息转换为易于测量的电压信号;信号放大模块将表征温度的电压信号放大,放大倍数与全温区档位数量和分辨率要求有关;数据处理模块依据 AD 转换器返回的数据控制偏置切换模块输出各档位偏置电压值,实现温区自动切换;温

度量化模块通过 AD 转换器将模拟信号量化为数字量并发送至数据处理模块。

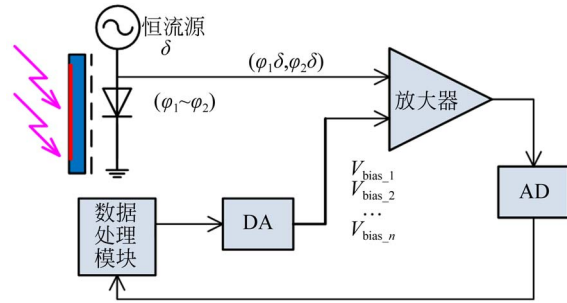


图 1 红外探测器星上温度测量系统组成

Fig. 1 Composition of satellite-borne infrared detector temperature measurement system

假设需测量的温度范围为  $(\alpha, \beta)$ , 温敏元件对应的阻值范围为  $(\varphi_1, \varphi_2)$ , 恒流源电流为  $\delta$ , 则测温元件端的电压范围为  $(\delta\varphi_1, \delta\varphi_2)$ 。将全温区划分为  $n$  个小范围的温区, 对于第  $i$  个温区, 其电压范围为:

$$\Gamma_i \in \left[ \varphi_1 \delta + (i-1) \cdot \frac{\varphi_2 \delta - \varphi_1 \delta}{n}, \varphi_1 \delta + i \cdot \frac{\varphi_2 \delta - \varphi_1 \delta}{n} \right]. \quad (1)$$

为最大程度满足测温分辨率要求, 需将每个小温区的电压范围放大至 AD 的输入满量程 (设为  $0 \sim \mu$ ), 因此信号放大模块的放大倍数为:

$$\lambda = \frac{\mu}{(\varphi_2 \delta - \varphi_1 \delta) / n}. \quad (2)$$

此时, 系统的测温分辨率为:

$$\varepsilon = \frac{(\beta - \alpha)}{n \cdot 2^N}. \quad (3)$$

即若要在测量温度范围为  $\alpha \sim \beta$  时测量系统的测温分辨率达到  $\varepsilon$ , 而现有的 AD 转换器位数只有  $N$  位时, 则须要划分  $n$  个温区以满足测温分辨率的要求。

档位之间的切换通过数据处理模块实现。数据处理模块接收并判读温度量化模块反馈的数值, 若该数值达到 AD 满量程数值, 则控制 DA 调整信号放大模块中的偏置电压, 调整当量为:

$$\varphi = \frac{\varphi_2 \delta - \varphi_1 \delta}{n}. \quad (4)$$

直至 AD 输出为非饱和值为止, 以上所述温区档位自动切换原理如图 2 所示。

假设放大器某一时刻输出的电压值为  $U$ , 经

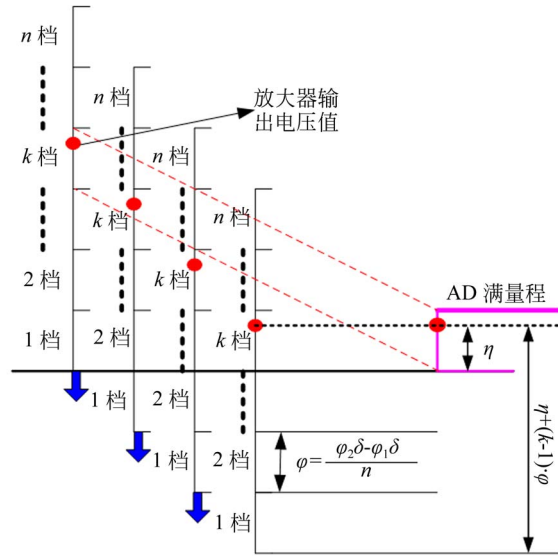


图 2 温区档位自动切换原理

Fig. 2 Schematic diagram of automatic switching of temperature zone

过  $k-1$  次自动切换之后, AD 输出变为非饱和值, 则可以确认  $U$  在第  $k$  个温区, 且有:

$$U = \eta + (k-1) \cdot \varphi \cdot \lambda, \quad (5)$$

其中  $\eta$  为 AD 输出值所对应的输入电压。从而得到对应的温度值为:

$$T = \alpha + (\beta - \alpha) \cdot \left[ \frac{(U/\lambda) - \varphi_1 \cdot \delta}{\varphi_2 \cdot \delta - \varphi_1 \cdot \delta} \right]. \quad (6)$$

### 2.2 温区切换临界点修正方法

AD 转换器在量程的两端非线性特性比较明显, 为了提升温度测量精度, 在 AD 转换器输入量程  $0 \sim \mu$  内选取线性特性较好的区间  $(\chi, \mu - \chi)$  作为测温的量化区域。为了提升测温曲线的连续性, 对温区划分临界点  $\left[ \alpha + i \cdot \frac{\beta - \alpha}{n} \right]$  附近的温度点  $\left[ \alpha + i \cdot \frac{\beta - \alpha}{n} - \Delta T, \alpha + i \cdot \frac{\beta - \alpha}{n} + \Delta T \right]$  采用相邻档位的数值进行中值滤波处理。

由于选取了  $(\chi, \mu - \chi)$  作为 AD 转换器的量化范围, 所以对不同温区偏置电压之间的数学关系相应地做出修正, 如下所示:

$$\begin{cases} \mu - \chi = \lambda(\Gamma_i^{\max} - V_{\text{bias}_i}) \\ \chi = \lambda(\Gamma_{i+1}^{\min} - V_{\text{bias}_{i+1}}) \end{cases}. \quad (7)$$

整理式 (7) 得到第  $i+1$  温区与第  $i$  温区间补偿电压  $V_{\text{bias}_i}$  与  $V_{\text{bias}_{i+1}}$  之间的调整当量为:

$$\varphi' = \frac{\mu - 2\chi}{\lambda}. \quad (8)$$

温区切换临界点附近的误差补偿能有效地对 AD 转换器输入测量上限与测量下限附近的突变进行校正,能够更好地提升该温度测量系统的可靠性。

### 3 实验与结果

#### 3.1 实验条件

根据第 2 节中的原理搭建红外探测器温度测量系统,如图 3 所示。

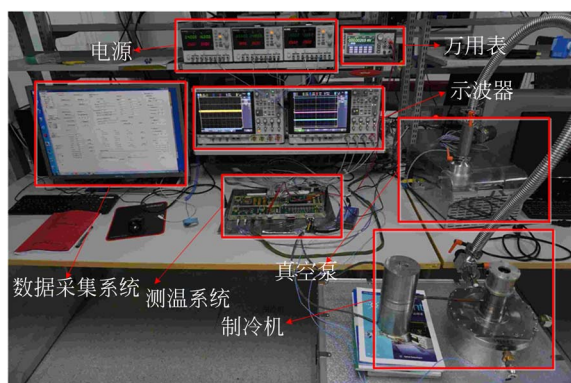


图 3 红外探测器测温实验系统

Fig. 3 Experimental system for temperature measurement by infrared detector

测量制冷机持续对探测器测量制冷温度曲线从 260 K 到 70 K 的温度变化,恒流源电路输出 1 mA 的恒定电流;放大模块增益设置为 80 倍;AD 转换器的输入量程为 0~5 V,为补偿温区切换,选取 0.2~4.8 V 作为测温的量化区域。

#### 3.2 实验结果与分析

图 4 为探测器温度与 AD 转换器量化的 DN 值曲线。可见该温度测量系统可自动完成换档测温功能并将温区划分为 6 个,且每个档位的曲线斜率基本相同,即在测量温度范围内分辨率都基本相同;嵌入的曲线显示 20 个码对应小于 200 mK 温度,测温分辨率在 10 mK/码以上。

图 5 为制冷过程中探测器温度随时间变化的曲线。可以观察到温度曲线平滑,无跳变数据点。

图 6 为相邻数据点的差分曲线。图中全为负值点,表明在温度持续下降的过程中,该测温系统反映的温度下降趋势与实际情况基本吻合,对温度的测量没有跳变点。

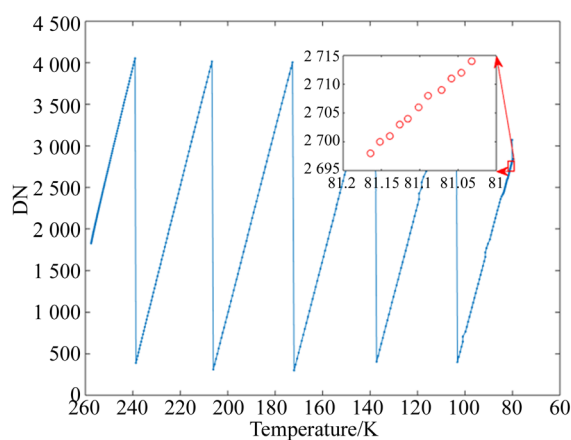


图 4 温度-码值曲线

Fig. 4 Temperature-code curve

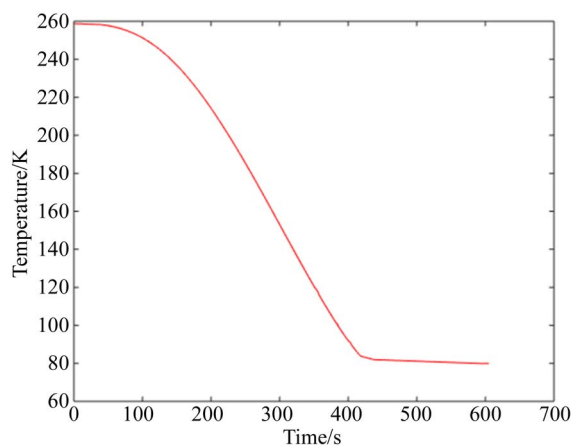


图 5 时间-温度曲线

Fig. 5 Time-temperature curve

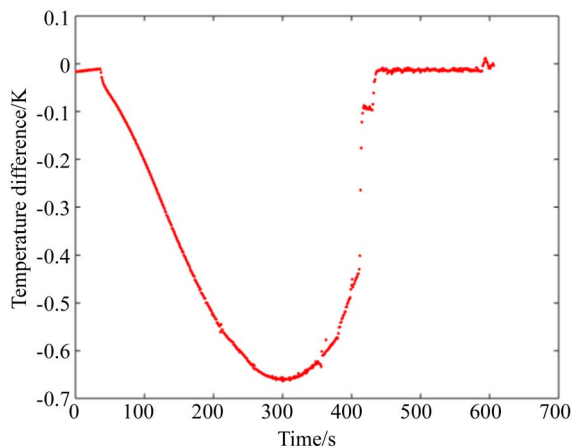


图 6 时间-温差曲线

Fig. 6 Time-temperature difference curve

根据图 4 中实验数据计算 6 个温区的平均分辨率分别为 8.3 mK/码, 8.8 mK/码, 9.0 mK/码, 9.1 mK/码, 9.1 mK/码, 9.1 mK/码, 而在图 4 窗口中数据的分辨率最高可达:

$$\epsilon = \frac{81.15 - 81.05}{\text{HEX2DEC}(A96 - A89)} \approx 0.00769$$

根据以上计算数据可知,该测温系统的平均分辨率可达 9.1 mK/码,最高分辨率可达 7.6 mK/码。

以该温度测量系统测量持续降温的探测器温度情况,得到温度-码值变化曲线以及时间-温度的变化曲线,证明了温区自动换档功能以及温区切换临界点修正方法的有效性。根据计算得到平均测温分辨率为 9.1 mK/码,最高分辨率可达

7.6 mK/码,满足红外探测器星上温度测量系统的大范围高分辨率测温要求。

## 4 结 论

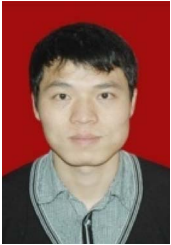
本文根据航天领域在轨温度的高分辨率测量要求,设计了基于全温区分档以及档位自动切换功能的在轨红外探测器温度测量系统,介绍了该系统的结构组成并描述了自动换档功能的实现方法。测温实验结果表明:该系统可以实现 70~260 K 的大范围温度测量,且兼具最高 7.6 mK/码的测量分辨率,满足星上测温要求,能够为后续在轨红外探测器的高稳定性温度控制提供技术保障。

## 参考文献:

- [1] 洪津,王征云,胡亚东,等. 星载红外探测器组件寿命试验研究及系统设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1148-1155.  
HONG J, WANG ZH Y, HU Y D, et al.. Research of life test and design of system for satellite-borne infrared detector assembly[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1148-1155. (in Chinese)
- [2] 付智红. 一种用于星上半导体制冷器的温度控制方法[J]. 空间电子技术, 2016, 13(3): 76-80.  
FU ZH H. A method of observing and controlling temperature of the black-body calibration device in infrared radiation camera [J]. *Space Electronic Technology*, 2016, 13(3): 76-80. (in Chinese)
- [3] 张亮. 一种基于 AD590 宽范围测温电路[J]. 电子制作, 2016(7): 9-12.  
ZHANG L. A wide range temperature measuring circuit based on AD590 [J]. *Practical Electronics*, 2016(7): 9-12. (in Chinese)
- [4] 赵博宏, 孙蓉. 基于硅三极管的测温电路工作原理分析及应用[J]. 传感器世界, 2018, 24(6): 17-20.  
ZHAO B H, SUN R. Working principle analysis and application of temperature measuring circuit based on silicon triode[J]. *Sensor World*, 2018, 24(6): 17-20. (in Chinese)
- [5] 李聪明, 罗怡, 周传鹏, 等. 微热管红外测温系统的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2449-2455.  
LI C M, LUO Y, ZHOU CH P, et al.. Design of infrared temperature measurement system for micro heat pipe[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2449-2455. (in Chinese)
- [6] YI X J, LIU C M. Development of high-precision temperature measurement system based on ARM[C]. 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, August 16-19, 2009. Beijing, China. New York, USA: IEEE, 2009.
- [7] 郝小鹏, 宋健, 孙建平, 等. 风云卫星的红外遥感亮度温度国家计量标准装置[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1845-1851.  
HAO X P, SONG J, SUN J P, et al.. Vacuum radiance temperature national standard facility for Infrared remote sensors of Chinese Fengyun meteorological satellites[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1845-1851. (in Chinese)
- [8] 胡鹏程, 时玮泽, 梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 988-995.  
HU P CH, SHI W ZH, MEI J T. High precision Pt-resistance temperature measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 988-995. (in Chinese)
- [9] 朱均超, 豆梓文, 李嘉强, 等. 高精度大范围的光学晶体温度控制系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(7): 1604-1611.  
ZHU J CH, DOU ZH W, LI J Q, et al.. High-precision and wide-range optical crystal temperature control system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1604-1611. (in Chinese)
- [10] 肖薇, 张雷. 测温电路全温区自动测试系统设计[J]. 微处理机, 2018, 39(5): 61-64.  
XIAO W, ZHANG L. Design of automatic test system for temperature measuring circuit in full temperature range[J]. *Microprocessors*, 2018, 39

- (5): 61-64. (in Chinese)
- [11] 陈李. 基于 TMS320C6713B 的精密温度控制系统设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- CHEN L. *Designing and Implement of High-precision Temperature Control System Based on TMS320C6713B*[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [12] 杜帅帅, 柯沪琦, 胡燕海. 一种高精度温度测量系统设计[J]. 轻工机械, 2016, 34(3): 61-64.
- DU SH SH, KE H Q, HU Y H. Design of temperature measurement system with high precision [J]. *Light Industry Machinery*, 2016, 34(3): 61-64. (in Chinese)
- [13] LIAO T, PEI Y F, XU J, *et al.*. Fiber Bragg grating temperature sensors applied in harsh environment of aerospace[C]. 2018 *Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, October 26-29, 2018. Hangzhou. New York, USA: IEEE, 2018.

#### 作者简介:



黄良(1986—),男,广西贵港人,助理研究员,2008年于中国科学技术大学获得学士学位,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事航天遥感成像电子学及图像处理方面的研究。E-mail: hezqxfk9@126.com

#### 通讯作者:



韩诚山(1972—),男,辽宁盖州人,博士,研究员,博士生导师,1993年于吉林工业大学获得学士学位,1998年、2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事空间相机自动控制技术的研究。E-mail: hancs@163.com