

用于紫外光谱仪的探测器温度控制系统

蒋雪 侯汉 马庆军 林冠宇

Detector temperature control system for ultraviolet spectrometer

JIANG Xue, HOU Han, MA Qing-jun, LIN Guan-yu

引用本文:

蒋雪, 侯汉, 马庆军, 林冠宇. 用于紫外光谱仪的探测器温度控制系统[J]. *中国光学*, 2024, 17(1): 209–216. doi: 10.37188/CO.2023–0133

JIANG Xue, HOU Han, MA Qing-jun, LIN Guan-yu. Detector temperature control system for ultraviolet spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 209–216. doi: 10.37188/CO.2023–0133

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0133>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置

Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers

中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 294 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0294>

紫外双光栅光谱仪结构设计与波长精度分析

Structure design and wavelength accuracy analysis of ultraviolet double grating spectrometer

中国光学 (中英文). 2018, 11(2): 219 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0219>

基于光电探测的多光谱测温装置

Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection

中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 289 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0289>

谐振式集成光学陀螺系统中用于抑制背散射噪声的相位调制技术

Phase modulation techniques for suppressing backscattering noise in resonator integrated optic gyroscopes

中国光学 (中英文). 2019, 12(6): 1403 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1403>

紫外增强硅基成像探测器进展

Silicon-based ultraviolet photodetection: progress and prospects

中国光学 (中英文). 2019, 12(1): 19 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0019>

基于伪微分和加速度反馈的航空光电稳定平台控制方法

Control scheme of aerial photoelectrical stabilized platform based on pseudo-derivative and acceleration feedback

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 491 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0491>

文章编号 2097-1842(2024)01-0209-08

用于紫外光谱仪的探测器温度控制系统

蒋雪*, 侯汉, 马庆军, 林冠宇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了降低探测器的噪声与暗电流, 使光谱仪的 CMOS 探测器能获得更准确的光谱曲线, 设计了探测器温度控制系统。本系统核心采用基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的增量式比例-积分-微分(PID)控制算法。在传统控制算法的基础上, 增加了抗积分饱和控制, 并且在 PID 算法的前端增加了对目标值的过渡过程。该系统在实现探测器温度变化速率可控的同时, 也解决了超调过大的问题。多次整机环境实验结果表明: 在轨环境温度条件下, 40 °C 温差范围内该系统可以控制探测器以指定温变速率(4.5±0.05) °C/min 达到任意温度; 并且可在该温度下稳定工作; 温度变化范围为 ±0.1 °C。相比于传统模拟 PID 控制方法, 其具有灵活度高, 稳定性强等优点。当制冷到-10 °C 时, 探测器的噪声得到了有效抑制。

关键词: 增量式 PID 算法; 抗积分饱和; 输入过渡过程; 噪声

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0133

Detector temperature control system for ultraviolet spectrometer

JIANG Xue*, HOU Han, MA Qing-jun, LIN Guan-yu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: jiangxue470@163.com

Abstract: A temperature control system that employs an incremental PID algorithm based on FPGA technology has been developed to decrease detector noise and dark current while ensure the CMOS detector of the spectrometer obtain more accurate spectrum curve. Considering the current temperature and the control parameters, the appropriate control quantity is calculated to ensure the detector realize the target temperature. Controlling the temperature change rate of the detector is realized through front stage control, effectively solving the problem of overshooting. By adding the anti-integral saturation algorithm and the transition link of the target value, the function of the temperature change rate of the detector is controllable, and the problem of overshoot is solved. Multiple environmental tests conducted on the entire machine indicate that the system can control the temperature of the detector to reach any desired temperature within a specified temperature difference range of 40 °C under the ambient temperature condition in orbit. The sensor temperature has a margin of error of ±0.1 °C. Compared to the conventional analog PID control method, the proposed

收稿日期: 2023-08-07; 修订日期: 2023-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62005268)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62005268)

method offers significant advantages of high sensitivity and strong stability. At a temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the noise of the detector is substantially reduced.

Key words: incremental PID; anti-integral saturation; input transition process; noise

1 引言

大气臭氧(O_3)、平流层气溶胶等微量气体的密度和垂直分布情况,对气候变化和大气环境研究有重要价值。FY-3 紫外临边光谱仪是借助卫星平台观测地球临边大气紫外-可见波段太阳后向散射的光学遥感仪器。探测获得的光谱遥感信息对于农业、气候、军事等方面的发展具有重要意义^[1-3]。

FY-3 紫外临边光谱仪,选用的是英国 e2v 公司生产的背照式互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器,测量范围是 290 nm~500 nm 紫外波段。CMOS 探测器和电荷耦合器件(CCD)探测器性能相当,但是 CMOS 探测器具有驱动时序复杂度低、开发周期短、成本低的优点。CMOS 探测器分为背照式和正照式两种。背照式 CMOS 探测器的结构布局使其不受遮挡,故其比正照式 CMOS 探测器接收光子的能力更强,灵敏度更高,更适合用于航天领域。因此,本文选用背照式 CMOS 探测器。但是,由于背照式 CMOS 探测器的工艺特殊,在常温条件下产生的暗电流较高,噪声较大,为了提高图像质量,需要将背照式 CMOS 探测器置于低温条件下应用。除此之外,极快的温度变化产生的温度冲击可能会对背照式 CMOS 探测器造成不可逆的损伤,导致探测器获取的图像出现大量的异常像素。这些异常像素的光响应情况不同于正常像素的感光情况,将影响图像质量。为了解决上述问题,本文设计了探测器温度控制系统,以使探测器的温度达到控制要求。

本文设计的探测器温度控制系统核心采用的是 PID 控制。PID 控制算法是一种应用于过程控制的闭环控制算法,可以起到动态修正实测值与目标值之间偏差的作用,广泛应用于各种工业控制中的连续系统^[4-5]。传统的温控系统是在硬件上搭建 PID 控制单元,用模拟控制的方式调节探测器温度。这种模拟控制方式的灵活度很低,不

易更改,调试难度较高^[6-7]。本文设计的温度控制系统是基于 FPGA 实现的数字 PID 控制。这种数字控制方式灵活度很高,可以在软件界面预留参数输入入口。通过更改控制参数,灵活调整制冷目标温度、温变速度与温控精度,这种调节的灵活性大大提高了仪器的研制效率,而且在轨观测时,如遇突发状况也可以灵活应对。但是直接使用 PID 控制算法会带来一些问题,比如,偏差过大引起的温度冲击问题^[8-10],积分饱和问题。本文通过加入输入过渡过程和抗积分饱和处理对基础 PID 控制进行改进,最终达到探测器温度的控制要求。

本文介绍了 FY-3 紫外临边光谱仪探测器温度控制系统的组成、工作原理和实现方法。通过多次大型整机环境实验验证该系统性能。结果表明:本系统可实现对 FY-3 紫外临边光谱仪 CMOS 探测器温度的精确控制,探测器目标温度可以灵活更改,并且在指定控制参数下,可以使探测器温度变化速率和控温精度均满足控制要求。

2 温度控制系统的构成及其工作原理

FY-3 紫外临边光谱仪的安装位置是舱内,在轨运行时,仪器的环境温度是室温。根据探测器的特性和探测需求,需要将 CMOS 探测器的工作温度保持在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,低于环境温度。所以设计的 CMOS 探测器的温度控制系统需具备降温功能。而对于探测器工作结束后的回温过程,可以通过逐渐减弱制冷器的制冷强度,再通过探测器自身与环境的热交换,使探测器温度恢复到环境温度,故 CMOS 探测器的温控系统不需要具备升温功能。除此之外,还需要保证探测器的温度不被周围电源模块、汞灯、钨灯等其他辐射源干扰。

2.1 CMOS 温度控制系统的构成

图 1 为温度控制系统结构图。本温控系统由温度采集单元、算法控制单元、功率控制单元、半导体制冷器、CMOS 探测器组成。

探测器内置 MF501 测温热敏电阻。温度采集单元由多路选择器、运算放大器、A/D 转换器组成。功率控制单元由 D/A 转换器、运算放大器、场效应管组成。算法控制单元由 FPGA 实现, 内含遥测采集模块、PID 调节模块、制冷输出等模块。

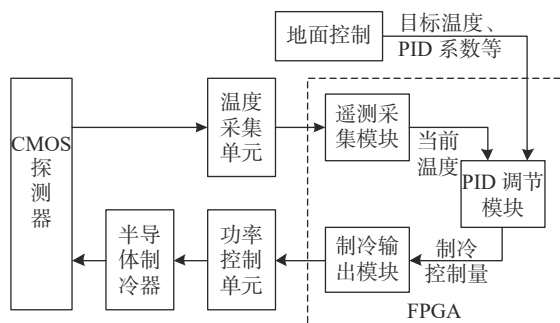


图 1 温度控制系统结构图

Fig. 1 Block diagram of temperature control system

2.2 温度控制系统的工作原理

系统采用帕尔贴效应对探测器制冷。制冷器与焦平面之间安装了导热块。探测器的温度通过导热块传输到焦平面, 进而传输到用于整机散热的热管中。

设定遥测采集周期为 500 ms, FPGA 控制遥测采集模块每间隔 500 ms 驱动一次外部 DAC, 采集探测器当前温度遥测值。PID 调节单元根据来自地面注入的目标温度、PID 系数, 结合当前温度遥测值, 利用增量式 PID 算法计算出制冷控制增量, 控制增量与上次输出的控制量叠加得到当前控制量, 然后制冷输出模块驱动外部 DAC 将当前控制量输出到功率控制单元, 功率控制单元将制冷控制量作用到制冷器上, 实现对探测器制冷。

周期地循环上述过程, 即可实现对探测器温度的动态调节。合适的制冷电流变化规律可以使探测器以指定的温变速率变化到目标温度, 并且以一定精度稳定在目标温度。本系统中, FPGA 输出的制冷控制量越大, 制冷电流越大, 系统制冷强度越强。制冷控制量与制冷强度正相关。

3 温度控制系统的关键算法

3.1 PID 算法

PID 控制原理图如图 2 所示。PID 算法由比

例项(Proportion)、积分项(Integral)、微分项(Differential)组成。设目标值为 $r(t)$, 实测值为 $y(t)$, PID 控制算法的输入为目标值与实测值的偏差 $e(t)$, 输出为 $u(t)$ 。PID 算法对一段时间以来的偏差 $e(t)$ 进行比例、积分、微分计算, 得到控制值 $u(t)$, 将控制值 $u(t)$ 作用到被控对象, 即可实现对被控对象的控制^[10]。

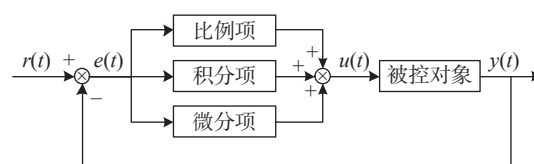


图 2 PID 控制原理图

Fig. 2 Schematic diagram of PID control

设比例项系数为 K_p , 积分时间常数为 T_i , 微分时间常数为 T_d , PID 控制算法在连续系统中的公式为:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 当温度偏差存在时, 比例项将针对当前偏差立即起到减小偏差的作用; 积分项是针对过去所有的偏差, 起到消除系统偏差的作用; 微分项是根据偏差的变化规律提前阻止即将发生的变化。对于这种结合现在、过去、将来的控制, 理论上, 如果系数合适, 即可实现对被控对象的动态校正。

3.2 数字 PID 算法

由于数字控制是一种离散采样的过程, 需要将模拟 PID 控制算法离散转化成数字 PID 算法后, 才能应用于数字控制中。数字 PID 算法有两种: 位置式 PID 算法和增量式 PID 算法。

3.2.1 位置式 PID 算法

位置式 PID 算法是由模拟 PID 算法离散化后直接得到的。设采样间隔为 T , 采样序号为 k , 模拟 PID 算法离散化后, 即得到位置式 PID 算法表达式:

$$u_k = K_p \left(e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right) = K_p e_k + K_i \sum_{j=0}^k e_j + K_d (e_k - e_{k-1}) \quad (2)$$

其中, K_i 是积分项系数, K_d 是微分项系数。

3.2.2 增量式 PID 算法

增量式 PID 算法是由位置式 PID 算法变形而来, 它的输出为控制量的增量 Δu_k 。增量式 PID 算法与位置式 PID 算法的关系为:

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} \quad (3)$$

将式 (2) 位置式 PID 算法的表达式带入式 (3), 得到增量式 PID 算法表达式:

$$\Delta u_k = K_p(e_k - e_{k-1}) + K_i e_k + K_d(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \quad (4)$$

对比式 (2) 和式 (4) 可以看出, 位置式 PID 算法需要对历次的偏移量进行累加和计算, 而增量式 PID 算法只需要计算最近三次的偏移量。二者相比较, 增量式 PID 算法的计算量更小、稳定性更强, 更适用于基于 FPGA 的数字控制系统。

由于本系统内的功率控制单元不具备记忆能力, 不能接收控制增量只能接收控制量, 所以选择用 FPGA 储存上次的控制量, 利用式 (3), 将上次的控制量与本次计算的控制增量相加, 得到本次控制量, 最终将本次控制量输出到功率控制单元实现控制。

3.3 算法的改进

3.3.1 目标值过渡过程

PID 算法是一种快速调整偏差的算法, 如果实测值与目标值的偏差很大, 为了快速校正偏差, 会产生较大的控制量。在本系统中, 当系统刚启动或探测器目标温度改变时, 制冷目标温度与探测器当前温度可能会相差较大。这种情况下, 为了使探测器温度达到目标温度, PID 控制会连续产生最大制冷电流, 使探测器温度快速下降。但是由于背照式 CMOS 探测器的工艺特性, 温度冲击可能会对探测器造成不可逆的损坏。为了提高系统稳定性, 延长探测器寿命, 要求探测器的温度按照 $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \sim 5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度变化。

考虑到探测器要求的温变速率区间较小, 但是探测器温度对制冷电流的响应很快, 设计时在 PID 算法的前端增加了一个过渡过程控制。使输入到 PID 算法的探测器目标温度按照要求的温变速率缓慢变化。

已知要求的变化速率为 $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \sim 5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 那么将 $4.5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 作为目标温度过渡过程的变化

速率 v 。为了便于调试, 将时间步长 n 与温度增量 ΔT 均设计为界面可输入的参数。则有,

$$r_k = r_{k-n} + \Delta T \quad (5)$$

由于系统采样间隔是 500 ms, 所以时间步长的单位是 500 ms。这个过渡过程可使每间隔 n 个 500 ms, 输入到 PID 控制器的目标温度增加或减少 ΔT 。通过多次单机、整机、整星大型环境实验可以证明, 当设置 $n = 8$, $\Delta T = 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 在回温和制冷的过程中, 均可使探测器温度变化速度达到要求的 $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \sim 5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

3.3.2 抗积分饱和控制

PID 调节单元输出的制冷控制量是通过外部 DAC 作用到制冷器的。真正作用到制冷器的控制量的范围受 DAC 的量化位数限制。本系统中使用的 DAC 是 12 位量化, 那么, 实际可输出的控制量的码值范围是 000H 至 FFFH。

本系统有制冷功能没有加热功能。控制探测器制冷是增大控制量的过程; 控制探测器回温是减小控制量的过程。PID 调节单元输出到 DAC 的控制量越大, 那么制冷电流越大, 系统的制冷强度越强。当控制量为 FFFH 时, 制冷电流达到最高, 值为 1.1 A。反之, PID 调节单元输出到 DAC 的控制量越小, 那么制冷电流越小, 系统的制冷强度越弱, 当控制量为 000H 时, 制冷电流达到最小, 值为 0 A。此时制冷电路的开关状态不变, 只是不起制冷作用。

当 PID 算法得到的控制量低于极限小值 000H, 或高于极限大值 FFFH 时, 如果不对输出做限幅处理而直接截断输出, 那么实际制冷作用可能会与预期相差较大, 甚至相悖。这种情况将会导致制冷时间过长, 甚至出现震荡而无法制冷, 达到目标温度。

这种现象是由积分饱和导致的, 解决的办法是对 PID 调节单元的输出做限幅处理, 即, 当 PID 算法得到的控制量超过 FFFH, 那么 PID 调节单元将输出最大边界值 FFFH, 并且取消积分作用, 即将积分项系数置 0; 当 PID 算法得到的控制量是负值, 那么 PID 调节单元将输出最小边界值 000H, 并且取消积分作用, 即将积分项系数置 0。只有当控制量在 000H 至 FFFH 范围时, 才执行积分运算, 并输出控制量。

4 温度控制系统的实现

4.1 数字 PID 算法

由图 3 探测器温度码值曲线可知, 探测器的温度越低, 对应的码值越大; 在本系统中, 输出控制量越大, 制冷效果越强。在本系统中, 偏差为目标值减去实测值, 即:

$$e_k = r_k - y_k, \quad (6)$$

即, 当制冷目标温度大于当前温度时, 温度偏差的符号为正, 否则为负。

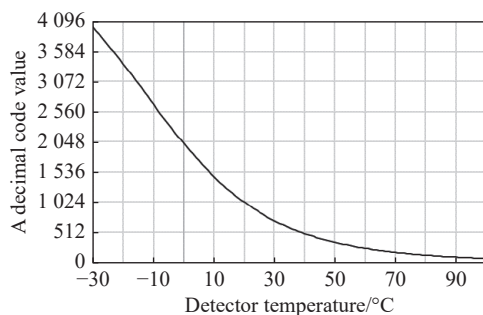


图 3 探测器温度和码值关系曲线

Fig. 3 Relationship between detector temperature and code values

图 4 为此温度控制系统的软件实现流程。按照系统要求, 遥测采样的间隔为 500 ms。在温控流程中, 每个遥测采样时刻均为一次温度调节的开始时刻。此温控系统的实现流程为:

当采样时刻到来时, 首先, 从遥测采集模块读取探测器当前温度遥测值, 同时读取经过前置滤波器的当前目标温度;

接着, 计算当前温度遥测与目标温度值的偏差, 并标记偏差的符号, 同时缓存前两次的温度偏差和偏差的符号;

然后, 将最近三次的偏差和偏差符号带入增量式 PID 算法, 计算控制增量并标记控制增量的符号;

利用式 (3), 将控制增量与上一次的控制量叠加, 得到当前控制量;

再对当前控制量做限幅处理, 得到最终要输出的控制量;

最后, 驱动外部 DAC 将限幅后的控制量输出到功率控制单元, 进而作用到制冷器。此时一次温度调节结束, 等待下一次采样时刻到来, 重复上面过程, 开展新一次温度调节。

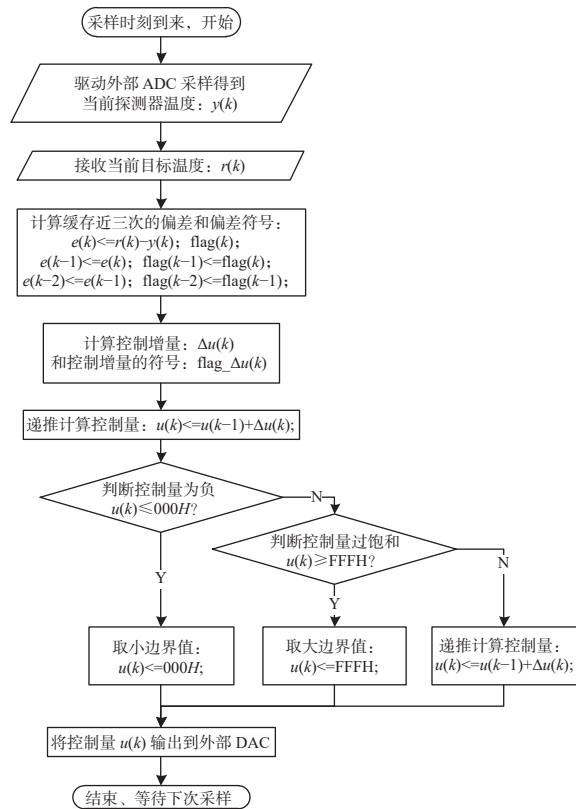


图 4 温度控制系统的软件流程图

Fig. 4 Flow chart of temperature control system software

4.2 PID 参数整定

PID 控制算法由比例项、积分项、微分项组成, 每一项的系数决定了该项作用的强弱。

比例项的作用是快速修正偏差, 比例项系数越大, 效果越强, 但如果比例项系数过大, 将会产生较大超调; 积分项的作用是补偿系统的静差, 积分时间常数越小, 积分项作用越强, 消除系统静差的时间越短, 但如果积分项作用过强, 将会引起振荡; 微分项的作用是提前阻止偏差的变化, 在偏差变化之前进行修正, 适用于噪声较小的系统, 微分时间常数越大, 微分项作用越强, 合适的微分项系数可以加快修正速度, 提高系统稳定性。

PID 参数整定方法有临界比例法、反应曲线法、衰减法和经验法。本系统采用经验凑试法, 通过多次试验, 根据实际控制情况, 按照比例系数、积分系数、差分系数的顺序调整, 最终选择合适的 PID 系数。

5 测量实验与结果

经过多次整机温度循环、老炼等环境实验发现, FY-3 紫外临边光谱仪探测器温控系统制冷或

回温的温度变化速率均可通过数据注入灵活调节,目标温度也可通过数据注入灵活控制。该系统可在指定参数下满足探测器温度的控制要求。

系统要求探测器制冷和回温的速率均满足 4 °C/min~5 °C/min。在多次环境实验中,随机提取一次制冷过程曲线如图 5(彩图见期刊电子版)所示,一次回温过程曲线如图 6(彩图见期刊电子版)所示。

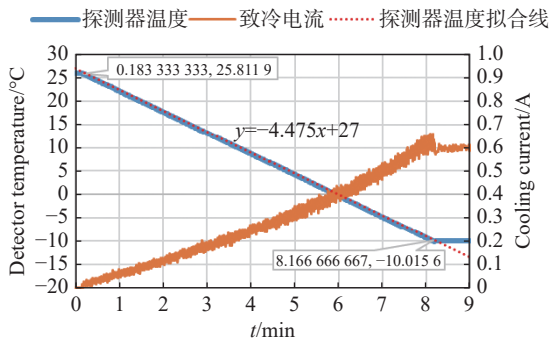


图 5 制冷过程曲线

Fig. 5 Temperature cooling curve of the detector

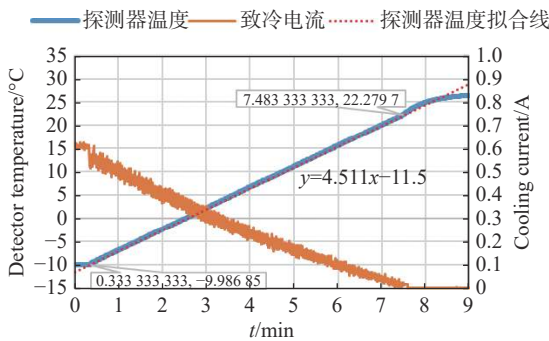


图 6 回温过程曲线

Fig. 6 Temperature rising curve of the detector

由图 5 制冷过程曲线可以看出,随着制冷电流的增大,探测器温度在降低。由图 6 回温过程曲线可看出,随着制冷电流减小,探测器温度在升高。制冷电流在变化过程中有微小的调整,使得探测器温度基本呈线性变化。将图 5 和图 6 中探测器温度曲线在温度变化阶段进行拟合。可以看出,探测器温度的变化速率控制在 (4.5±0.05) °C/min 内,满足指标范围要求。

探测器制冷目标温度默认为-10 °C,但也可根据实验情况随时调整,如图 7 和图 8 分别为制冷目标温度为-5 °C 和-10 °C 时,在一个轨道时间内持续工作过程中,探测器温度散点图。可见,目标温度分别为-5 °C 和-10 °C 时,控制误差均可以达到±0.1 °C,优于指标±0.2 °C。

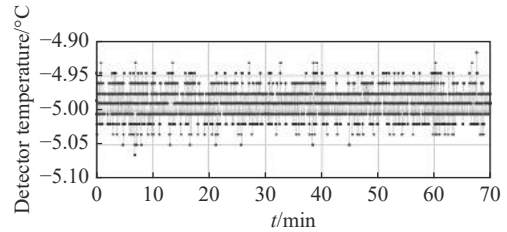


图 7 目标温度为-5 °C 时的温度散点图

Fig. 7 Scatter plot of temperature at a target temperature of -5 °C

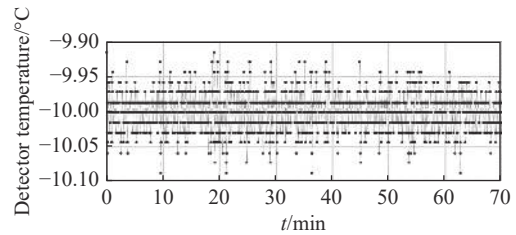


图 8 目标温度为-10 °C 时的温度散点图

Fig. 8 Scatter plot of temperature at a target temperature of -10 °C

FY-3 紫外临边光谱仪使用的探测器有效感光区域为 2000×100,光谱维覆盖 2000 行,空间维覆盖 100 列。在轨运行时,对有效感光图像的光谱维 2000 行不合并,空间维 100 个像元合并后再下传。

使用钨灯作为标准光源,积分时间设置为 12 s,分别在室温 23 °C 条件和制冷到-10 °C 条件下拍摄 100 帧,曲线对比情况如图 9(彩图见期刊电子版)所示。图 9 横坐标为有效感光区域的光谱维序号 1~2000;纵坐标为有效感光区域的空间维 100 个像元合并后的 DN 值。

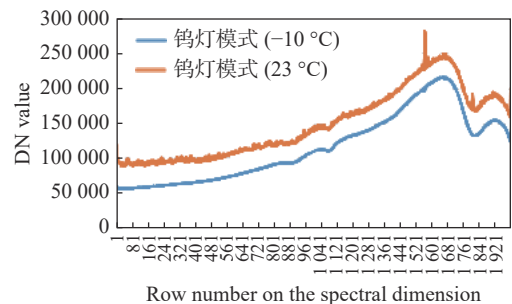


图 9 不同温度的钨灯曲线图

Fig. 9 Temperature curves of different tungsten lamps

由图 9 可看出,常温下,曲线有两处尖峰,这是由探测器上的坏点造成的,它们对于光响应与其他正常像素的反应不同。通过使探测器降温,异常像素的光响应将恢复正常,曲线的异常尖峰值也将消失。并且,温度的降低使得探测器的暗

电流降低, 光谱曲线向下平移, 并且噪声减小, 光谱曲线更加平滑。取对应像元在 100 帧内的平均值作为信号值, 标准差作为噪声, 信号值除以噪声可得到信噪比。绘制信噪比曲线如图 10 所示。可见, 信噪比在探测器温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时比温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时有所提高。

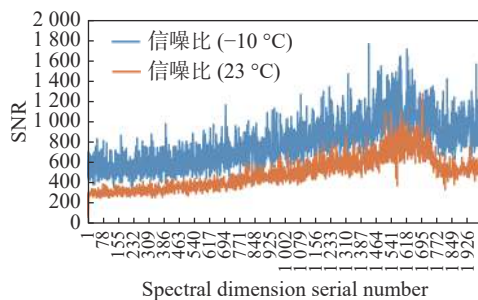


图 10 不同温度的信噪比曲线

Fig. 10 SNR curves at different temperatures

将入光口遮住, 使探测器置于暗场环境, 积分时间设置为 12 s, 分别在室温 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件和制冷到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下拍摄 100 帧图像。剔除上述两处尖峰位置的异常点, 计算对应像元在 100 帧的标准差, 作为暗噪声, 绘制曲线如图 11 所示。可见, 在制冷的作用下, 探测器暗噪声得到了有效抑制。

参考文献:

- [1] 薛庆生. 星载多谱段双视场紫外大气探测仪[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2101-2108.
XUE Q SH. Spaceborne multiband UV atmospheric sounder with two fields[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2101-2108. (in Chinese).
- [2] 崔程光, 王淑荣, 黄煜, 等. 多模式星载被动大气探测仪在轨天底/临边探测匹配方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0601001.
CUI CH G, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. Study on the method of passive multi-mode space-based atmospheric sounding spectrometers nadir and limb matching in-flight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0601001. (in Chinese).
- [3] 杨小虎, 王淑荣, 黄煜. 地球临边紫外环形成像仪几何定标技术研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0913004.
YANG X H, WANG SH R, HUANG Y. Research of geometric calibration of the earth annular ultraviolet limb imager[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0913004. (in Chinese).
- [4] 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 Z W, LI J Q, *et al.*. High-precision and wide-range optical crystal temperature control system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1604-1611. (in Chinese).
- [5] 王建刚, 杨洪涛, 于晓周, 等. 大型气候环境试验舱冷热端温度动态模糊 PID 协调控制[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(24): 3159-3167.
WANG J G, YANG H T, YU X ZH, *et al.*. Dynamic fuzzy-PID coordinated control of the cool-hot end temperature of large climate environmental test chambers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(24): 3159-3167. (in Chinese).
- [6] 王青, 姚泽坤, 张寅, 等. 基于 ADN8834 的高精度 DBR 激光器温度自动控制系统[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(5): 609-616.

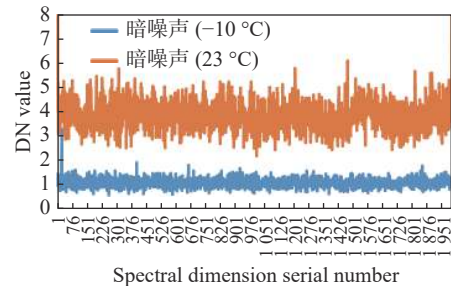


图 11 不同温度的暗噪声曲线

Fig. 11 Dark noise curves at different temperatures

6 结 论

本文介绍了一种 FY-3 紫外临边光谱仪探测器的温度控制系统。通过对比实验看出, 低温条件下, FY-3 紫外临边光谱仪探测器的噪声得到了有效抑制。通过多次大型整机环境实验可以证明, 此温控系统的目标温度和温变速率均可通过数据注入灵活调节。在指定参数下, 制冷速率和回温速率均可以控制在 $(4.5\pm 0.05)\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 满足 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的指标要求。在不同目标温度下, 控温精度均可达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 优于指标要求。本文所设计的探测器温度控制系统具有灵活度高, 控温精度高, 抗干扰能力强的特点。

- WANG Q, YAO Z K, ZHANG Y, *et al.*. High accuracy temperature control system of DBR laser based on ADN8834[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(5): 609-616. (in Chinese).
- [7] 穆叶, 胡天立, 陈晨, 等. 采用模拟 PID 控制的 DFB 激光器温度控制系统研制[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 0405001.
- MU Y, HU T L, CHEN CH, *et al.*. Development of temperature control system of DFB laser using analog PID control[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0405001. (in Chinese).
- [8] 张佩杰, 宋克非. 极光成像仪滤光片高精度温度控制系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(S1): 177-182.
- ZHANG P J, SONG K F. Design of high accuracy temperature control system of auroral imager light filter system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 177-182. (in Chinese).
- [9] 姜炎坤, 朴亨, 王鹏, 等. 采用线性自抗扰技术的高精度温度控制系统研制[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 20210813.
- JIANG Y K, PIAO H, WANG P, *et al.*. Research on high precision temperature control system using linear auto disturbance rejection technique[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 20210813. (in Chinese).
- [10] 李禹希, 张刘, 陈思桐, 等. 基于自抗扰算法的光电跟踪伺服控制方法研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 562-567.
- LI Y X, ZHANG L, CHEN S T, *et al.*. Photoelectric tracking servo control method based on active disturbance rejection algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 562-567.

作者简介:



蒋雪 (1992—), 女, 吉林长春人, 硕士, 研究实习员, 2015 年、2018 年于吉林大学分别获得学士学位、硕士学位, 主要从事空间紫外遥感技术的研究与设计。E-mail: jiangxue470@163.com