

doi:10.3788/gzxb20174603.0311004

机载成像光谱仪 CCD 制冷系统设计与实现

张泉^{1,2}, 黄书华¹, 赵欣¹, 司福祺¹, 周海金¹, 王煜¹, 刘文清¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230031)

摘 要:为减小紫外成像光谱仪中 CCD 暗电流噪声, 提高系统信噪比, 需要对 CCD 进行制冷. 为此采用模拟比例-积分-微分电路设计了 CCD 制冷电路, 利用 Ziegler-Nicholas 经验整定方法确定比例-积分-微分参量, 以实现降温速率不大于 5℃/min、温度稳定度为 ±0.05℃, 满足最大制冷温差. 将该制冷系统应用于机载成像光谱仪进行了测试, 结果表明: 环境温度变化不会影响制冷效果, 在达到制冷目标温度 -20℃ 后, CCD 探测器暗背景下光谱维噪声平均灰度响应值为 1 702, 暗背景信号非均匀性下降到 0.5%, 满足光谱数据反演要求.

关键词:成像光谱仪; 温度控制; 差分吸收光谱; 模拟比例-积分-微分控制; 半导体制冷器

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0311004-7

The Design and Implementation of CCD Refrigeration System of Imaging Spectrometer

ZHANG Quan^{1,2}, HUANG Shu-hua¹, ZHAO Xin¹, SI Fu-qi¹, ZHOU Hai-jin¹,
WANG Yu¹, LIU Wen-qing¹

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: To decrease CCD dark current noise and improve the signal to noise ratio in airborne ultraviolet imaging spectrograph, CCD working temperature should be decreased as CCD is temperature sensitive device. So CCD cooling circuit was designed by adopting analog PID algorithm, and its parameters were determined by Ziegler-Nicholas method. The max cooling rate is less than 5℃/min and its temperature stability is about ±0.05℃, satisfying the requirements of maximum cooling temperature difference. The cooling circuit has been tested on airborne system. The experimental results show that change of temperature could not affect the cooling results. And after reaching the target refrigeration temperature of -20℃, dark background noise of spectral dimension CCD detector is 1 702 on average and dark signal response non-uniform decreases to 0.5%. The results meet the requirements of spectral data.

Key words: Imaging Spectrometer; Temperature control; Differential optical absorption spectrometry; Analog proportion integration differential control; Thermoelectric cooler

OCIS Codes: 110.2970; 040.1520; 120.0280; 120.6200

0 引言

紫外成像光谱仪是 CCD 成像技术和光谱技术相结合的产物, 具有高光谱遥感图谱合一的特点^[1-4], 能够对目标区域内的痕量气体进行实时在线监测, 定量获得区域上空空气质量变化以及污染气体运输过程, 监测

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41605017)和国家重点研发计划(No. 2016YFC0200401)资助

第一作者: 张泉(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为成像光谱光电技术. Email: qzhang@aiofm. cas. cn

通讯作者: 黄书华(1976-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学检测和光谱仪电子学. Email: hsh@aiofm. cas. cn

导 师: 司福祺(1977-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光学检测和光谱学. Email: sifuqi@aiofm. cas. cn

收稿日期: 2016-08-03; 录用日期: 2016-12-08

<http://www.photon.ac.cn>

工业排放和生物燃烧对大气成分的影响,并最终服务于区域大气成分监测与预警技术体系.光谱仪通过探测器采集目标区域的光谱图像,通过差分吸收光谱技术(Differential Optical Absorption Spectrometer, DOAS)反演目标区域大气痕量气体的柱浓度. CCD 探测器暗电流具有很强的温度相关性,温度每升高 5~7 K,暗电流增加约一倍^[5].对成像光谱仪 CCD 探测器进行制冷可抑制暗电流噪声,提高痕量气体反演准确度,获得更加准确的痕量气体反演结果^[6-10].某航空相机采用英国 E2V 公司二维面阵 CCD47-20^[11]作为成像探测器,该 CCD 内部集成真空封装半导体制冷器帕尔贴(Peltier)用于 CCD 制冷.目前,制冷控制方式包括模拟比例-积分-微分(Proportion Integration Differential, PID)和数字 PID 两种,黄渐强等利用模拟 PID 方法设计了半导体激光器温控系统,控温稳定度达到 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ^[12];李江澜等采用数字式 PID 控制器设计的温控系统准确度达到 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ^[13].现有 CCD 制冷系统多采用数字式温控系统,通过昂贵的控制芯片实现复杂 PID 算法以实现较高的控制准确度^[14-15].对于复杂环境适应性、可靠性较差.对此,迫切需求一套低成本、高准确度、可靠的且对复杂飞行环境具有一定适应能力的制冷系统.

本文开展了紫外机载成像光谱仪 CCD 制冷控制系统设计,采用 AVR 单片机和 CPLD 实现,控制方式采用模拟 PID 控制.通过 CCD 内部集成的半导体制冷片实现温度控制,运用模拟 PID 算法调节制冷电流,实现对制冷目标温度和准确度的控制.将该制冷电路应用于机载航空成像光谱仪试验平台进行测试,达到理想制冷效果,试验结果验证了 CCD 暗噪声的温度相关性.

1 系统总体介绍

机载紫外成像光谱仪是以航空飞机为平台,以推扫方式测量目标区域光谱图像的有效载荷,在考虑其重量、功耗以及可靠性等因素的基础上进行了系统总体设计.

1.1 紫外成像光谱仪系统结构

紫外成像光谱仪由光机头部、温控箱和电源箱组成,如图 1.光机头部主要完成光谱信息获取、光电转换功能,由前置光学系统、CCD 探测器及驱动控制系统、数传系统组成;温控箱完成对 CCD 探测器的制冷功能;电源箱为光机头部电路部分提供所需的电源.利用面阵 CCD 探测器成像系统,通过一次测量得到污染气体在一个方向的浓度分布,同时,由系统扫描获取空间维.自地表散射、反射的光信息通过系统的前置望远镜会聚后,进入中继光学系统.将对应谱段的光反射会聚进入 Offner 结构成像光谱仪,在光谱仪内色散成像到面阵 CCD 探测器上,形成光谱维和空间维数据,通过差分吸收光谱技术反演二维阵列数据,获取目标区域痕量气体浓度分布.

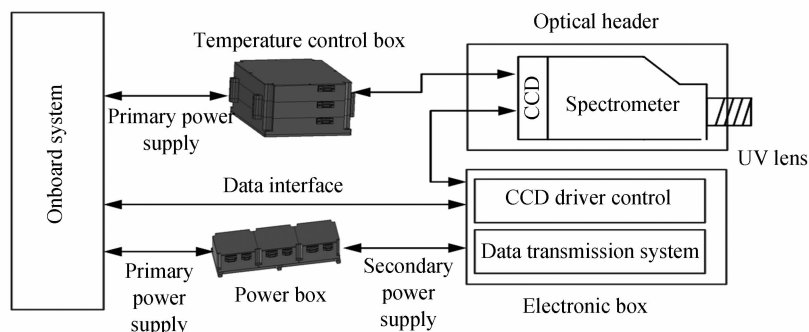


图 1 紫外成像光谱仪系统结构
Fig. 1 Schematic diagram of imaging spectrometer

1.2 制冷型 CCD 探测器

光谱仪成像探测器与观察设备不同,要求每个像元具有很大的信号动态范围,即低分辨率、高准确度^[8].由此,选用英国 E2V 公司生产带制冷紫外增强型探测器 CCD47-20,实物如图 2 所示. CCD47-20 单像元的满势阱电荷量达到 100Ke-/pixel,动态范围 50K : 1,像元尺寸为 $13\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$,最大读出速率为 5 MHz,性能指标均满足紫外光谱仪设计要求.其内部封装半导体制冷器 Peltier,可用于 CCD 制冷,其最大工作电压 5 V,最大电流 1.7 A,最大功耗 6 W 情况下冷热面温差可达 58°C .

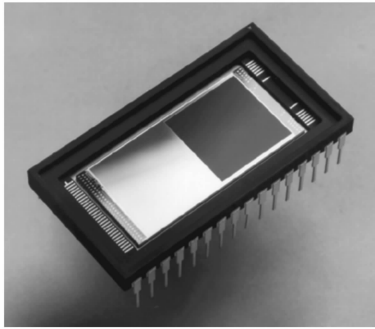


图 2 CCD47-20 实物图

Fig. 2 Physical picture of CCD47-20

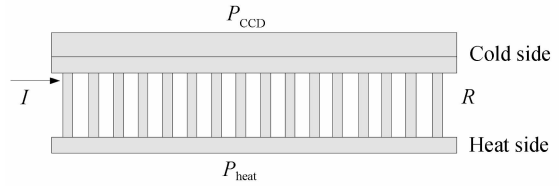


图 3 Peltier 结构示意图

Fig. 3 Schematic of peltier

在应用制冷器之前, 进一步了解其性能, CCD 内部集成的 Peltier 结构如图 3 所示. 其中 R 为 Peltier 总内阻, 当有电流 I 通过时, 冷端将从周围(即 CCD 表面)吸收热量 P_{CCD} , 并产生焦耳热. 此过程可描述为

$$P_{CCD} + I^2 R = P_{Heat} \quad (1)$$

同时, Peltier 在热端释放热量 P_{Heat} 到周围环境中, 即

$$P_{Heat} = (T_{Heat} - T_{Environment}) \beta \quad (2)$$

式中, β 为该环境下热导率.

2 制冷控制方案

结合机载光谱仪小型化以及可靠性考虑, 制冷电路应尽量稳定可靠. 基于 CCD47-20 内部集成的 Peltier 设计制冷电路, 为实现稳定度优于 $\pm 0.05^\circ\text{C}$, 采用图 4 所示的设计方案. 单片机进行温度阈值设置, CPLD 产

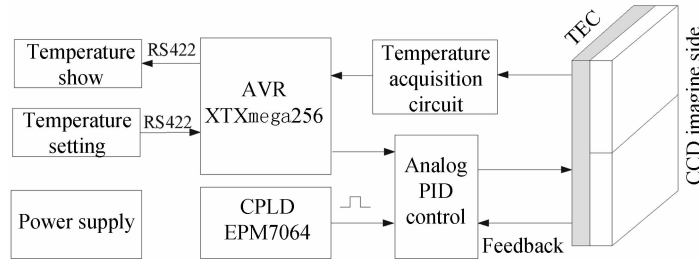


图 4 CCD 制冷控制框图

Fig. 4 Schematic of CCD cooling system

生的方波可调脉宽的 PWM 波, 经过模拟 PID 控制电路调节产生模拟制冷信号, 驱动 CCD 内部集成的半导体制冷片进行制冷; 并通过其集成的温度传感器产生温度反馈信号, 设定温度与反馈温度的偏差经过模拟 PID 电路控制制冷电流. 有电流通过半导体制冷片时, 产生帕尔贴效应, 制冷片从其一面吸收热量在另一面释放, 利用吸热面即可作为制冷系统制冷部件. 直到反馈温度与设定温度相等即达到预设制冷温度, 温度采集电路采集 CCD 像面温度, 并将 CCD 实时温度通过 RS422 串口传送到工控机用于显示.

2.1 模拟 PID 控制及参量整定

模拟 PID 控制电路主要由差分放大电路、比例积分电路、比较放大电路等组成. PID 通过对系统偏差量进行比例放大、积分和微分运算, 调节输出量降低系统误差, 所设计模拟 PID 电路如图 5. 首先要建立 CCD 温度控制系统的数学模型. 由于该制冷系统控制对象为 CCD 探测器的温度, 可以将其近似为纯滞后一阶惯性系统, 其传递函数可表示为

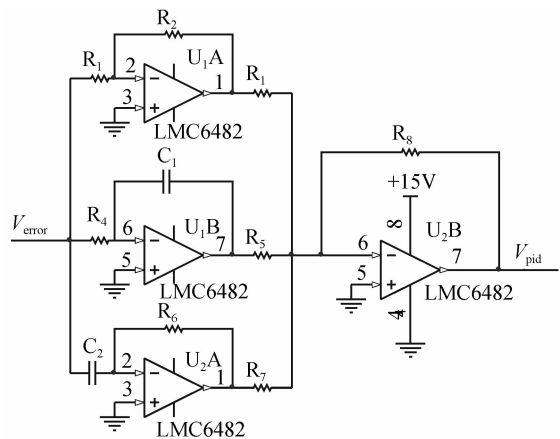


图 5 模拟 PID 控制电路

Fig. 5 Analog PID control circuit

$$G(s) = Ke^{-\tau} (Ts + 1) \tag{3}$$

式中, K 为系统放大系数, T 为过程时间常量, τ 为纯滞后时间.

对于 PID 控制器, 其传递函数为

$$G_C(s) = K_p (1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s) \tag{4}$$

根据 Ziegler-Nicholas 经验整定方法可得到系统 PID 参量, 见表 1.

表 1 Ziegler-Nicholas 经验方法得到的参量

Type	K_p	T_I	T_D
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$P_{cr}/1.2$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$P_{cr}/2$	$P_{cr}/8$

表中 K_{cr} 是系统产生临界振荡时系统放大倍数, P_{cr} 为临界振荡周期.

采用临界灵敏度法确定 PID 控制参量. 具体方法是: 首先, 将系统积分项 T_I 设定为零, 即采用纯比例控制, 缓慢增大比例系数直至系统产生临界振荡为止; 然后, 根据系统响应得到此时的放大系数 K_p

和临界振荡周期 T_I ; 最后根据表 1 中 Ziegler-Nicholas 经验整定方法计算 PID 控制器的参量, 重新将系统设定为此参量进行测试, 如不满足指标要求, 则反复进行调节直至结果符合要求.

2.2 Peltier 驱动电路

PID 控制电路最终产生的是半导体制冷片制冷电流, 采用 H 桥控制电路来实现其制热和制冷功能, 使探测器温度稳定在设定值, 电路如图 6 所示^[4]. 两对 MOS 管相当于 4 个开关, P-MOS 管在栅极电压为低电平时导通, 而 N-MOS 管在栅极电压为高电平时导通, 调整两对 MOS 管的开关状态, 实现加热和制冷目的. H 桥输出端连接制冷片两端 TEC+ 和 TEC-. 当电流从 TEC+ 流向 TEC- 时, 制冷片为制冷状态, 反之为加热状态. 如图 5 所示, 当 P_1 为低电平、 P_2 为高电平时, Q_2 和 Q_3 关闭, Q_1 和 Q_4 导通, 电流从制冷片正极流向负极, 制冷片开始制冷; 当 P_1 为高电平、 P_2 为低电平时, Q_2 和 Q_3 导通, Q_1 和 Q_4 关闭, 电流从制冷片负极流向正极, 制冷片工作状态为加热. 此外, 当 P_1 和 P_2 同时为高电平或同时为低电平时, 制冷片两端无压差, 没有电流通过即为不工作状态. 通过 P_1 和 P_2 端口脉宽调制波的控制, 实现对制冷片制冷和加热, 从而达到精确控温的目的. 本设计采用 ISR7319 作为 H 桥驱动芯片, 每个芯片含有 P、N 型 MOSFET 各一个.

2.3 系统软件设计

系统软件主要实现对环境温度和 CCD 温度的实时采集, CCD 制冷温度阈值的设定及对降温速率的控制, 通过 RS422 串口完成与上位机的实时温度数据通信. 程序包括主程序、温度采集子程序、CCD 制冷温度设置子程序和中断处理子程序等.

系统上电或复位时首先进行初始化, 包括系统时钟初始化, 由内部标定的 RC 振荡器产生 CCD 温度采样初始化; 制冷温度阈值设定; 上传数据定时器设定为 1 s. 然后执行降温速率控制程序, 单片机读取设置的 DAC 输出值, DAC 值每降低 1℃ 延时 12 s, 控制 CCD 降温速率不大于 5℃/min, 直到 DAC

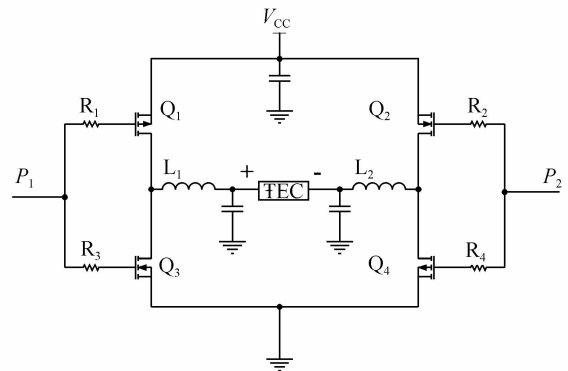


图 6 H 桥电路原理
Fig. 6 Schematic of H Bridge circuit

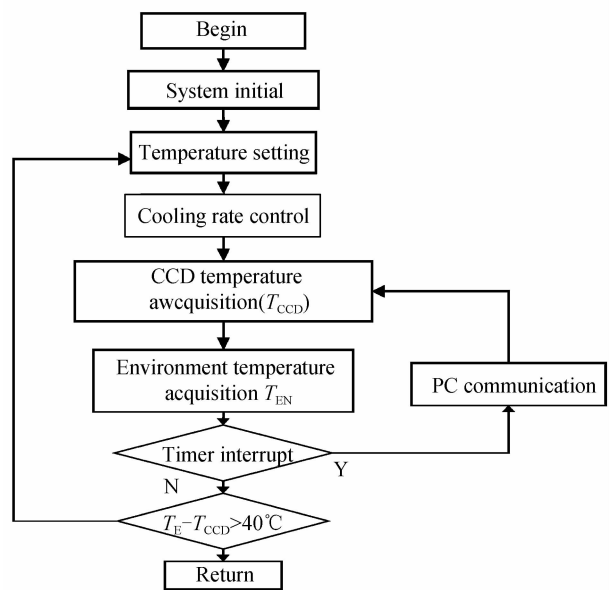


图 7 制冷控制系统软件流程
Fig. 7 Software flow chart of cooling control system

输出值和预设目标制冷温度值相等. 通过外部模拟 PID 控制将 CCD 稳定在目标温度. 同时, 由单片机发出读取温度指令, 通过 CCD 内部集成和电路板上的两个温度传感器对当前温度进行采样. 定时器产生 1s 中断, 则将所测得的 CCD 温度和环境温度数据通过 RS422 串口发送至上位机进行通信. 由于要求环境与制冷温差不得超过 40℃, 所以需要软件判定是否达到制冷下限, 如达到返回更改制冷设定值.

3 试验结果及分析

对制冷系统软件和硬件进行模拟测试后, 将其应用于机载紫外光谱仪 CCD 成像系统, 对 CCD 探测器做了温度控制试验. 利用高低温箱模拟实际飞行时环境温度, 试验中, 利用温控系统调节 CCD 制冷温度并将实时温度数据传送到工控机, 成像系统测试 CCD 暗噪声.

3.1 CCD 制冷试验

由于光谱仪 CCD 制冷温度一般在 -15℃ 到 -25℃ 之间, 所以对该温度范围的制冷效果进行重点测试. 制冷效果的好坏受 Peltier 发热面散热效果、环境温度等因素影响, 光谱仪 CCD 实际散热方式为传导散热, 即通过大面积铝块将热量传导到机箱外壳. 根据飞行测试需求, 飞行高度不低于 3 km 且测试过程中飞行高度不变. 大气对流层温度随高度变化, 每升高 1 km 温度降低 6℃, 可知测试过程中温度低于 20℃. 据此进行了环境温度变化制冷试验, 将制冷模块置于高低温箱, 模拟实际飞行温度范围 0~20℃. 设置高低温箱温度在 0~20℃ 变化、设置制冷目标温 -20℃, 连续采集 CCD 实际温度. 如图 8 所示, CCD 温度从 20℃ 下降到 -20℃ 需要 8 min, 满足降温速率不大于 5℃/min 的指标要求. 在 CCD 温度达到稳定后, 温度波动范围在 -0.05~+0.05℃, 稳定后温度数据标准差为 <0.1, 说明在 0~20℃ 范围内制冷温度不受环境温度变化影响, 制冷电路温度稳定性和可靠性良好, 可应用于光谱仪 CCD 制冷. 通过以下方法可进一步提高制冷准确度: 1) 通过滤波降低系统电源纹波, 选择有效位为 14 位模数转换器和数模转换器; 2) 对温漂较大的芯片(放

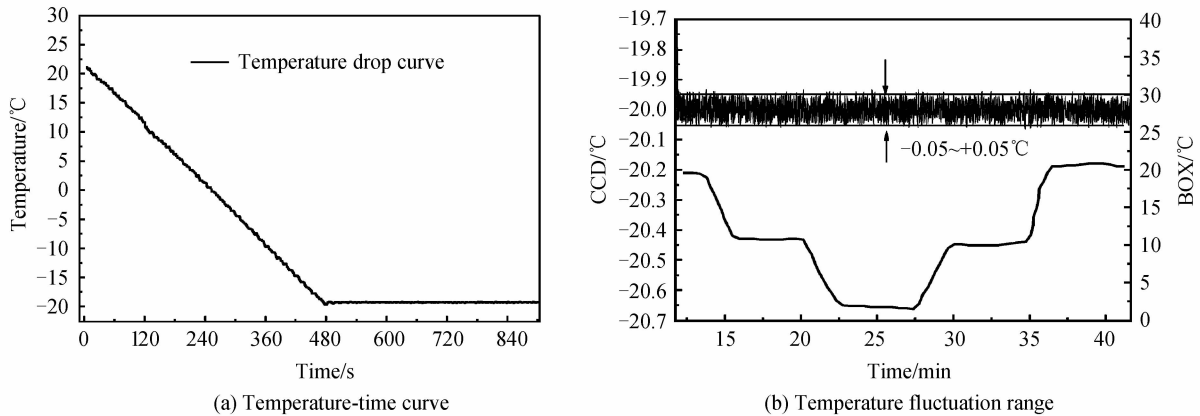


图 8 制冷控制试验结果
Fig. 8 Temperature control result

大器、比较器)进行补偿, 缩小和非线性处理; 3) 优化 PID 控制器参量整定.

3.2 CCD 暗噪声试验

CCD 暗噪声主要包括暗电流噪声、散粒噪声和复位噪声, 其中复位噪声可通过相关双采样技术消除, 暗电流成为光谱仪暗背景噪声的主要来源. 暗电流噪声是 CCD 内部由热生电荷载流子产生, 强烈依赖于 CCD 表面温度, 冷却可使热生电荷生成速率显著降低. 将此制冷系统应用于成像光谱仪中, 设置制冷温度, 遮盖光谱仪入光镜头, 测试不同温度下的暗背景噪声, 可得到 CCD 噪声与温度的变化关系. 制冷温度分别设置为 -30℃、-20℃、-15℃、-10℃、

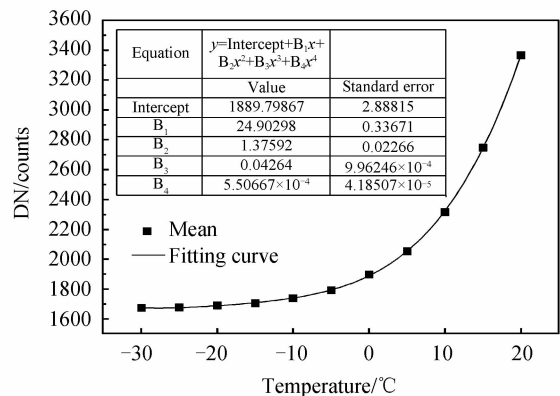


图 9 温度对 CCD 暗噪声的影响
Fig. 9 The effect of temperature on CCD dark noise

-5℃、0℃、5℃、10℃、15℃、20℃,积分时间为2 s,成像模式为全幅,采集10幅相应温度下的暗背景图像,将其进行平均,得到暗背景噪声(Dark Noise, DN)灰度响应值结果,如图9所示.从图中可以看出CCD温度较高时暗噪声随温度变化非常明显,制冷温度达到-20℃后,暗噪声随温度变化曲线比较平坦.在低温下暗噪声变化较弱的原因是CCD量子效率(Quantum Efficiency, QE)以及光生电荷从CCD电势阱转移到读出节点的能力也随温度下降而降低.因此,CCD制冷温度应设置合理范围,根据试验结果,在环境温度20℃条件下,该CCD最佳制冷温度在-20~-30℃.

3.3 暗信号响应非均匀性 DSNU 测试结果

暗信号响应非均匀性为暗背景下成像时CCD各像元响应的差异,表征暗电流分布的标准偏差为

$$DSNU = \frac{\sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=0, j=0}^{m, n} (P_{ij} - \bar{P})^2}}{\bar{P}} \quad (5)$$

式中 $\sigma_{DSNU} = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=0, j=0}^{m, n} (P_{ij} - \bar{P})^2}$ 为整个像面暗信号响应值的标准偏差, m 、 n 分别为CCD像面的行数和列数(CCD47-20, 1033行×1072列), \bar{P} 为暗信号响应平均值.根据上一节暗噪声试验结果计算不同温度下的暗信号响应非均匀性,结果见表2.

表2 CCD温度数据
Table 2 DSNU at different temperatures

	30	20	10	0	-10	-20
σ	236.61	68.97	22.23	13.44	12.55	12.17
DSNU	7.2	2.5	0.88	0.54	0.51	0.50

从表2中可以看出,CCD工作在高温度时由于热噪声的随机性,整个像面的暗信号响应非均匀性将不能忽略,对CCD进行降温可有效降低暗信号响应非均匀性.当CCD温度30℃时,DSNU为7.2%,随着温度的降低DSNU呈指数下降,在制冷温度达到-20℃时,DSNU下降到0.5%,可忽略DSNU对反演结果的影响,符合光谱数据反演要求.

4 结论

本文根据机载成像光谱仪性能指标要求,设计了基于探测器CCD47-20的模拟PID制冷控制系统.该制冷系统降温速率不大于5℃/min,准确度达到±0.05℃,在0~20℃内不受环境温度变化影响.利用该系统对成像光谱仪进行了暗噪声温度测试,验证了制冷温度在-20℃时为合理成像温度.在制冷温度为-20℃时暗背景噪声平均DN值为1702,暗背景信号非均匀性下降到0.5%,满足光谱数据反演要求,为精确的痕量气体浓度反演提供了保证.

参考文献

- [1] WANG Wei, SHEN Zhi-xue. Optical system design of LCTF-based airborne high spectral resolution camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7): 0711003.
汪伟, 沈志学. LCTF机载高光谱相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, **44**(7): 0711003.
- [2] CHEN Wei, ZHENG Yu-quan, XUE Qing-sheng. Optical system design of airborne wide field-of-view hyperspectral imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1022001.
陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 宽视场航空高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2014, **43**(10): 1022001.
- [3] ZHAO Min-jie, SI Fu-qi, LU Yi-huai, et al. Spectral image correction method for space-born differential optical absorption spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(12): 1230002.
赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像校正方法研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(12): 1230002.
- [4] ZHOU Hai-jin, LIU Wen-qing, SI Fu-qi, et al. Spectral calibration for space-borne differential optical absorption spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(11): 2881-2885.
周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱定标技术研究[J]. 光谱学与光分析, 2012, **32**(11): 2881-2885.
- [5] WU Xing-xing, LIU Jin-guo, ZHOU Huai-de, et al. Influence of cooling on imaging quality of EMCCD camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(10z): 528-532.
武星星, 刘金国, 周怀得, 等. 制冷对电子倍增CCD相机成像质量的影响[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(10z): 528-

532.

- [6] LIU Jin, SI Fu-qi, ZHOU Hai-Jin, *et al.* Observation of two-dimensional distributions of NO₂ with airborne imaging DOAS technology[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(3): 034217.
刘进, 司福祺, 周海金, 等. 机载成像差分吸收光谱技术测量区域 NO₂ 二维分布研究[J]. 物理学报, 2015, **64**(3): 034217.
- [7] WANG Yu, LU Yi-huai, Zhao Xin, *et al.* Design and implementation of CCD imaging circuit for satellite-borne DOAS spectrometer[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(6): 664-668.
王煜, 陆亦怀, 赵欣, 等. 星载差分吸收光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施[J]. 激光与红外, 2015, **45**(6): 664-668.
- [8] 米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用[M]. 陈榕庭, 彭美桂, 译. 北京: 科学出版社, 2006: 102-103.
- [9] ZHANG Yu-heng, WEI Ming-zhi, SONG Qian, *et al.* Development of an astronomical modularized CCD universal controller[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(11): 1112003.
张玉衡, 魏名智, 宋谦, 等. 模块化天文 CCD 通用控制器[J]. 光子学报, 2016, **45**(11): 1112003.
- [10] GAO Zhi-fan, ZHANG Hong-ping, WU Qiong-shui, *et al.* Calibration and characterization of an AOTF-based hyperspectral imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7): 0711001.
高志帆, 张红平, 吴琼水, 等. AOTF 高光谱成像系统的标定及性能测试[J]. 光子学报, 2015, **44**(7): 0711001.
- [11] E2VCompany. CCD47-20Datasheet [EB/OL]. (2007-09) <http://www.e2v.com/resources/account/download-datasheet/1427>.
- [12] HUANG Jian-qiang, ZHAI Bing, HE Qi-xin, *et al.* A temperature control for near-infrared semiconductor laser used in gas detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 614003.
黄渐强, 翟冰, 何启欣, 等. 用于气体检测的近红外半导体激光器温控系统[J]. 光子学报, 2014, **43**(6): 614003.
- [13] LI Jiang-lan, SHI Yun-bo, ZHAO Peng-fei, *et al.* High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(6): 1746-1749.
李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高准确度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(6): 1746-1749.
- [14] LIU Yun-fang, ZHANG Xiao, LI Jian-wei, *et al.* Design of analog PID circuit system with parameter auto-tuning[J]. *Cryoennics*, 2013, **2**: 69-72.
刘云芳, 张晓, 李建伟, 等. 模拟 PID 电路参量自整定温控系统设计[J]. 低温工程, 2013, **2**: 69-72.
- [15] WANG Zhuo, MIN Kun-long, BAI Xue-bing, *et al.* Temperature control of semiconductor laser in gas sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, **32**(6): 43-46.
王琢, 闵昆龙, 白雪冰, 等. 气体传感器中半导体激光器的温度控制[J]. 传感器与微系统, 2013, **32**(6): 43-46.