

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.005

## 用于气体检测的中红外探测器温控系统设计

白云飞<sup>1,2</sup>, 叶松<sup>1,3</sup>, 李志伟<sup>2</sup>, 施海亮<sup>2\*</sup>, 熊伟<sup>2</sup>, 王新强<sup>1,3</sup>, 汪杰君<sup>1,3</sup>, 张文涛<sup>1,3</sup>

( 1 桂林电子科技大学工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室 安徽 合肥 230031;

3 广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004 )

**摘要:** 硒化铅 (PbSe) 中红外探测器是 CO 气体检测仪中的核心部件, 其响应率会随温度变化。对中红外探测器进行精确的温度控制可以有效地改善系统稳定性, 提高检测系统信噪比。首先分析了 PbSe 探测器温度特性, 根据 CO 检测仪设计指标提出了温控系统的高稳定性要求; 介绍了热电制冷器 (Thermoelectric cooling, TEC) 的工作原理; 提出了基于温湿度控制芯片 ADN8830 的温度控制方案并设计了输入电桥电路、TEC 功放电路和 PID 补偿电路。根据设计方案搭建了实验测试系统在室温环境下进行测试。测试结果表明: 该温控系统应用于大气 CO 浓度检测仪器可在 30 s 内进入稳定状态, 且 1 min 内温度波动小于  $\pm 0.02$  °C, 优于 CO 检测仪 1 ppm 精度指标所需的温度波动不大于  $\pm 0.1$  °C 的要求。

**关键词:** 中红外探测器; 温度控制; 热电制冷器; ADN8830

**中图分类号:** TP272      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-6141(2019)05-0351-08

## Design of Temperature Control System for Mid-Infrared Detector Used in Gas Detection

BAI Yunfei<sup>1,2</sup>, YE Song<sup>1,3</sup>, LI Zhiwei<sup>2</sup>, SHI Hailiang<sup>2\*</sup>, XIONG Wei<sup>2</sup>, WANG Xinqiang<sup>1,3</sup>,  
WANG Jiejun<sup>1,3</sup>, ZHANG Wentao<sup>1,3</sup>

( 1 School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,  
Guilin 541004, China;

2 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3 Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The PbSe mid-infrared detector is the core component of the CO gas detector and its response rate varies with temperature. Accurate temperature control of the mid-infrared detector can effectively improve

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 11703061), National Key Research and Development Program of China (国家重点研发计划, 2016YFB0500704)

**作者简介:** 白云飞 (1994 -), 研究生, 主要从事光电检测方面的研究。 **E-mail:** 871745979@qq.com

**导师简介:** 叶松 (1979 -), 博士, 研究员, 主要从事光学遥感方面的研究。 **E-mail:** yesongmail@sina.com

**收稿日期:** 2019-01-28; **修改日期:** 2019-02-18

\* **通信联系人.** E-mail: hlshi@aiofm.ac.cn

the stability of the system and signal-to-noise ratio. Firstly, the temperature characteristics of PbSe detector are analyzed. According to the design index of CO detector, the high stability requirements of temperature control system are put forward. Then the working principle of thermoelectric cooler (TEC) is introduced. The temperature control scheme based on temperature and humidity control chip ADN8830 is proposed, and the corresponding input bridge circuit, TEC power amplifier circuit and PID compensation circuit are designed. Finally the experimental test system is built according to the design scheme and tested at room temperature. The test results show that, when the temperature control system is applied in the atmospheric CO concentration detection instrument, it can enter a stable state within 30 s, and the temperature fluctuation within 1 min is less than 0.02 °C, which is superior to the requirement that the temperature fluctuation required for the 1 ppm accuracy index of the CO detector is not more than 0.1 °C.

Key words: mid-infrared detector; temperature control; thermoelectric cooler; ADN8830

## 1 引 言

由不同原子组成的气体分子,有不同的光谱吸收带。根据 CO 气体对特定波段的选择吸收性并结合比尔朗博定律可计算得到 CO 气体浓度。根据 HITRAN 数据库可知 CO 气体的光谱吸收带主要处于 1.5  $\mu\text{m}$  近红外波段和 4.65  $\mu\text{m}$  中红外波段,而中红外波段 CO 气体吸收效应更为明显,约是近红外波段几十倍,因此设计 CO 气体检测仪选用中红外探测器可以满足低浓度气体条件检测精度要求。常用中红外探测器材料有硫化铅 PbS、硒化铅 PbSe、碲镉汞 HgCdTe 等。其中硒化铅和碲镉汞探测器在 CO 吸收谱段有较高的探测率,可用于 CO 气体检测仪,但因碲镉汞探测器需采用液氮制冷,成本较高且不利于仪器长期工作需求,因此 CO 气体检测仪多采用基于热电制冷方式的硒化铅探测器。

PbSe 外探测器以其响应度高,噪声水平低等原因广泛应用于高精度检测类仪器中。然而与高探测率对应的是其苛刻的工作温度条件,通常为  $-20 \sim -50$  °C。由于温度变化会对量子效率、暗电流和响应率峰值波长等关键参数造成影响<sup>[1]</sup>,而仪器在室外条件下工作时,大范围的温度变化无法避免,因此对中红外探测器进行温度控制系统设计至关重要。

根据所设计 CO 气体检测仪, PbSe 探测器的温控系统应满足小空间、速度快、高精度的要求。基于帕尔贴效应的热电制冷器 (Thermoelectric Cooler, TEC) 具有体积小、响应速度快、高精度、无制冷剂、易于实现加热制冷转换等优势,是实现探测器高精度温度控制的理想制冷器件<sup>[2-3]</sup>,广泛应用于激光器<sup>[4-7]</sup>、CCD 成像<sup>[8]</sup>、红外探测器<sup>[9]</sup>等温控系统。本文根据 TEC 制冷原理,采用 ANALOG DEVICE 公司的专用温湿度控制芯片 ADN8830 设计了中红外 PbSe 探测器高精度温度控制系统。

## 2 温度控制理论分析

基于 TEC 的温度控制实现主要通过单片机或者专用芯片实现<sup>[10]</sup>,基于单片机的方法通常是通过采集热敏电阻两端电压,由单片机温控算法产生输出信号,经 DA 转换后驱动 TEC 制冷或制热。而专用集成芯片是通过采集热敏两端电压与设定电压值进行差值运算,由内置高增益放大器将误差电压放大,从而产生输出信号并经场效应管驱动后控制 TEC。

### 2.1 中红外探测器特性分析

探测系统总噪声由系统各组成部分噪声平方和的平方根表示。对于中红外 PbSe 探测器而言, 暗电流较小可忽略不计。探测器固有热噪声、散粒噪声以及由温度变化造成的电阻率变化是其主要噪声源<sup>[11]</sup>。因此得出探测系统信噪比为

$$S_{NR} = \frac{I_{scence}}{\sqrt{I_j^2 + I_{short}^2 + \Delta I^2}} \tag{1}$$

式中  $I_{scence} = R_I \cdot W$  为探测器给定偏压下输出信号;  $I_j = \sqrt{4KT B/R_{sh}}$  为探测器固有热噪声;  $I_{short} = \sqrt{2Bq(I_{dark} + I_{scence})}$  为探测信号与暗电流信号的散粒噪声;  $R_I$  为探测器响应率;  $W$  为检测仪光源辐照度;  $I_{dark}$  为探测器暗电流;  $\Delta I$  为探测器温度变化  $\Delta t$  时输出信号的变化量;  $K$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $B$  为系统带宽;  $R_{sh}$  为探测器分流阻抗;  $q$  为电子电荷。

所设计 CO 气体检测仪采用气体滤波相关技术, 由机械滤波轮带动高浓度 CO 气室和 N<sub>2</sub> 气室交替进入光路对光源进行调制, 探测器交替输出经 CO 高浓度气室吸收后的本底信号和经 N<sub>2</sub> 气室及大气 CO 气体吸收后的测量信号, 对两信号分离后进行后续运算从而计算出 CO 气体浓度。所设计 CO 气体检测仪检测系统部分参数如下表 1 所示。

表 1 CO 测量仪检测系统部分参数

Table 1 CO measuring instrument detection system part parameters

光源辐照度 (W/cm <sup>-2</sup> )	探测器响应率 (V/W <sup>-1</sup> )	探测器光敏面 (cm <sup>2</sup> )	探测器分流电阻 (MΩ)	系统带宽 (Hz)	单次测量时间 (s)
3.1×10 <sup>-6</sup>	7.87×10 <sup>4</sup>	0.09	2.8	200	120

根据检测仪对 CO 气体浓度检测精度指标分配, 中红外探测器部分信噪比下限值约为 100, 结合表 1 和 (1) 式信噪比表达式计算得到  $|\Delta I|$  最大值  $\Delta I_{max} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ V/}^\circ\text{C}$ , 由此得知在温度波动范围不大于  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 探测器信噪比满足仪器设计需求。且为满足仪器快速测量需求, 从开机至稳定状态时间需小于 30 s, 稳定状态至少维持 1 min。

### 2.2 控温工作原理分析

TEC 是根据热释电效应制作而成的 PN 结器件以实现电能与热能之间的转换。当两种不同的导体组成电路且通有直流电时, 在一个接头处会散发热量形成冷端, 另一接头处吸收热量形成热端。如图 1 所示,

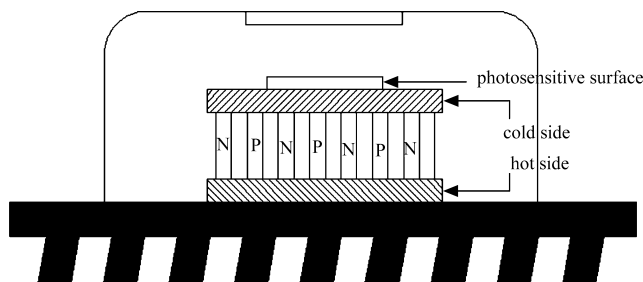


图 1 TEC 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of TEC

其内部集成的 P 型半导体和 N 型半导体构成电偶对。当电流流经电偶对时两端形成冷端与热端。其单个热电偶的纯制冷量为

$$Q = \alpha_{ab} T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K_a \Delta T \quad (2)$$

式中  $Q$  为单个电偶制冷量； $\alpha_{ab}$  为赛贝克系数； $T_c$  为热电偶冷端温度； $I$  为工作电流； $R$  为热电偶电阻； $K_a$  为热电偶导热系数； $\Delta T$  为冷热端温差。由 2 式可知，热电偶制冷量与工作电流大小和冷热端温差有关，工作电流越大、冷热端温差越低，则制冷效果越明显。因此控制目标工作温度可等效为控制 TEC 驱动电流大小，且通过安装热沉增加热端散热强度，可有效提高制冷效率，尤其是对于较低温度的工作条件。

### 3 温度控制系统设计

由于对所设计检测仪器有体积小、响应速度快且稳定性高等需求，因此采用 ANALOG DEVICE 公司生产的专用芯片 ADN8830 进行温控系统硬件设计。该芯片拥有集成度高，功耗低，温度稳定性较好等特点。其内部工作原理如图 2 所示。它利用电桥平衡原理，通过采集与 TEC 紧密贴合的热敏电阻两端电压，与设定电压值进行对比，产生的差值信号经补偿放大器放大后由 PWM 控制器进一步放大，产生推动外置 MOSFET 功率管工作的驱动电流，该驱动电流作用于 TEC 完成对探测器的制冷。反馈通路由高稳定性的 PID 补偿网络构成，通过调整 PID 参数可以改变系统响应特性。ADN8830 芯片采用半线性半开关工作模式，当 TEC 工作在大信号条件下时，输出级会工作在开关模式下，在小信号条件下工作时，输出级工作在线性模式下。这种工作方式在提高 TEC 制冷效率的同时，为 TEC 从大功率制冷到温度保持这一过程的稳定性提供了保障。

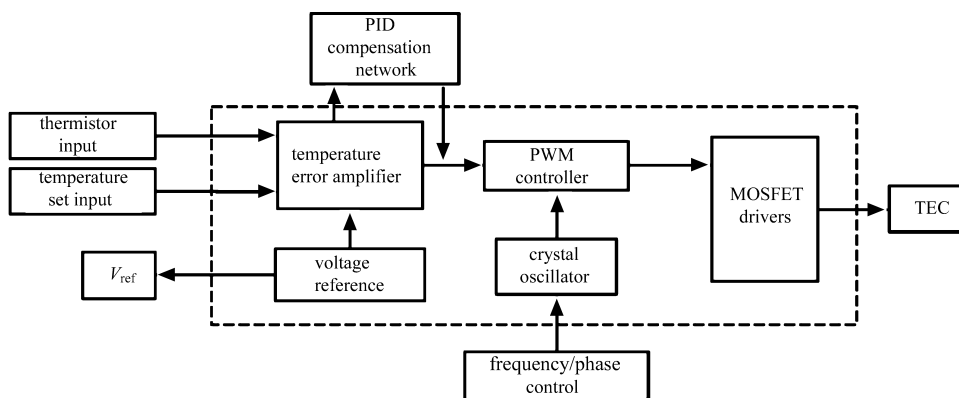


图 2 ADN8830 原理框图

Fig 2 Functional block diagram of ADN8830

#### 3.1 输入电桥电路设计

温度控制输入端电桥电路如图 3 所示。THERMIN 为热敏电阻反馈输入端，TEMPSET 为目标温度输入端，电桥由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_{TH}$  组成，其中  $R_{TH}$  为与 TEC 紧密贴合的热敏电阻，其阻值随温度降低而变大，电桥平衡时探测器达到目标温度。 $R_1$  的阻值选择与热敏电阻温度特性和工作温度有关，由于热敏电阻的阻值随温度变化为非线性， $R_1$  的阻值计算为

$$R_1 = \frac{R_{T1}T_{T2} + R_{T2}R_{T3} - 2R_{T1}R_{T3}}{R_{T1} + R_{T3} - 2R_{T2}} \quad (3)$$

式中  $R_{T1}$ 、 $R_{T3}$  分别为热敏电阻工作在两极限温度时的阻值,  $R_{T2}$  为热敏电阻工作在平均温度下的阻值。查阅热敏电阻温度曲线可得  $R_{T1}=1.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{T2}=5.45 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{T3}=39.05 \text{ k}\Omega$ , 由此计算得到  $R_1=4.28 \text{ k}\Omega$ , 取  $R_1$  为  $4.3 \text{ k}\Omega$ 。由电桥平衡原理计算得到目标温度输入端电压为

$$V_{\text{TEMPSET}} = \frac{R_{\text{TH}}}{R_{\text{TH}} + R_1} \quad (4)$$

设定温度为  $-45 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $R_{\text{TH}}=22.64 \text{ k}\Omega$ , 参考电压  $V_{\text{ref}}=2.47 \text{ V}$  由芯片内部提供, 可计算得到  $V_{\text{TEMPSET}}=2.1 \text{ V}$ 。从而可确定  $R_2$ 、 $R_3$  阻值。此处取  $R_2=22.6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3=4.3 \text{ k}\Omega$ 。考虑到温度控制精度和电路工作时温度变化, 以上电阻均需采用  $\pm 0.1\%$  高精度、温度系数优于  $\pm 10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  的精密电阻。

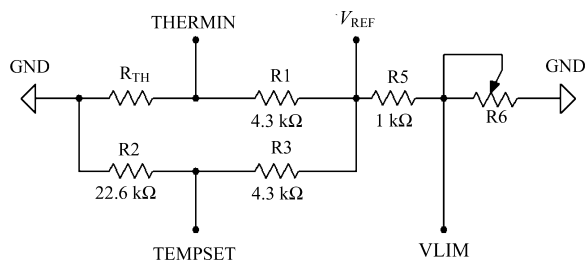


图 3 电桥输入电路

Fig.3 Bridge input circuit

制冷器最大工作电压由 VLIM 端电压确定为

$$V_{\text{TEC,MAX}} = 4(1.5 - V_{\text{VLIM}}) \quad (5)$$

考虑到若制冷电压过低, 则降温速率较慢, 而制冷电压过高会导致 TEC 损坏。因此采用滑动变阻器与定值电阻串联分压的方式对 VLIM 端电压进行调节, 设定  $V_{\text{TEC,MAX}}=1.8 \text{ V}$ 。

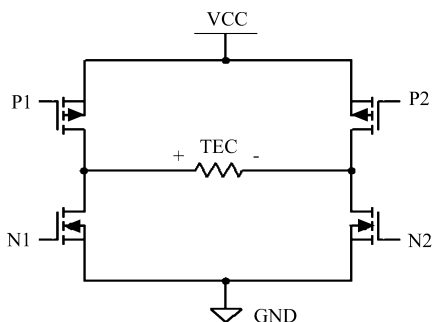


图 4 TEC 功率放大电路

Fig.4 Power amplifier circuit of TEC

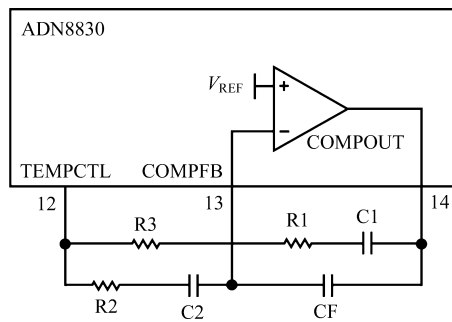


图 5 PID 温度补偿回路

Fig.5 Temperature compensation circuit

### 3.2 TEC 功率放大电路

ADN8830 采用半开关半线性的方式驱动 TEC。如图 4 所示由参数互补的两个 P 沟道和 N 沟道场效应管构成 H 桥电路对 TEC 进行驱动控制。ADN8830 对 H 桥左桥臂采用开关方式驱动, 对右侧桥臂采用线性驱动放大。在制冷工作状态下 P2 持续导通, N1 交替导通。在温度趋于稳定时, N<sub>2</sub> 持续导通, P1

按照开关频率交替导通与截止。场效应管的选择应使其导通电阻尽量小以降低其开关损耗提高负载效率。此处设计选用 FDW2520C 做为 TEC 驱动器件, 其 P 通道导通电阻小于 28 mΩ, N 通道导通电阻小于 57 mΩ。

### 3.3 PID 补偿设计

PID 控制是温控设计的重要部分, 其工作原理是通过对系统输出值与目标设定值之间的偏差值进行比例、积分、微分运算, 得到被控制对象的控制量为

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (6)$$

式中  $u(t)$  为 PID 控制器的输出,  $e(t)$  为偏差值,  $K_p$  为比例系数,  $T_i$  为积分时间常数,  $T_d$  为微分时间常数。根据具体控制精度与控制要求不同, 需要对比例积分微分项系数进行调节, 采用工程整定法对 PID 参数进行调节, 主要步骤如下

1) 将探测器热敏电阻和 TEC 接在 ADN8830 芯片应用电路中, 用示波器检测 TEC 两端输出电压。将电容 C1 短路 C2 开路, 仅留下电阻 R1 和 R3 组成简单比例补偿网络。

2) 增大 R1 和 R3 的比值, 观察示波器, 直至 TEC 两端电压出现震荡, 此时将 R1 与 R3 比值降为 1/2。

3) 添加电容 C1 至补偿网络中, 减小其电容值直至 TEC 两端电压出现震荡, C1 电容值设定为此时容值 2 倍。

4) 电阻 R2 短路, 增大 C2 的值, 直至 TEC 两端的电压开始震荡, 重新连接电阻 R2, 此时减小 C2 或者增大 R2 均可以消除震荡。一般来说 R2 大于 R3, C2 比 C1 小一个数量级。

5) 在以上调节过程中, 需观察输出电压的波形, 可以适当减小 C1、C2、R2 值以降低最小上升时间和消除电压过冲的影响。

设计了如图 5 所示的 PID 补偿电路, 按照上述步骤确定补偿网络中各个阻容值。实验验证当  $R_1=100$  kΩ,  $R_2=1$  MΩ,  $C_1=10$  μF,  $C_2=1$  μF 时, PID 温度补偿稳定性良好, 达到预期实验效果。

## 4 实验结果与分析

根据所设计温度控制系统搭建了实验测试平台, 为避免因热量集聚导致温度下降困难, 制作了铝制热沉并在热沉与探测器接触面涂抹导热硅脂。因温度值不便直接测量, 因此通过测量 PbSe 探测器输出电阻值, 并根据阻值与温度对应关系反演出温度值。由手册得知 PbSe 光电导探测器在 -45 °C 时阻值约为 2.82

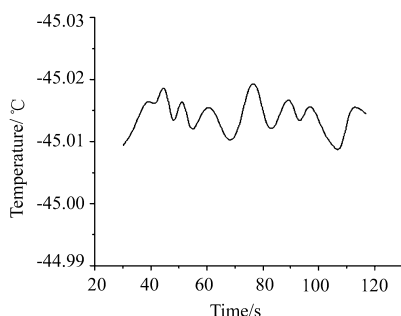


图 6 稳态温度波动曲线

Fig.6 Steady-state temperature fluctuation curve

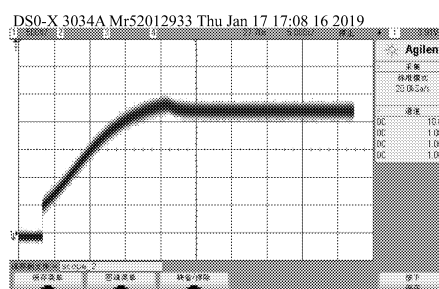


图 7 控温过程电压曲线

Fig.7 Voltage curve of control process

MΩ, 采用电阻串联分压的方式对其稳定性进行评估, 总电压 5 V, 串联分压电阻 3.3 MΩ。测试结果如图 6 所示。

如图 7 示波器显示, 从常温状态下 (25 ℃) 开机开始计时, 18 s 时电压曲线达到峰值, 25 s 左右进入稳定状态, 稳定后探测器端电压值约为 2.3 V。为分析温度稳定后波动细节, 对探测器两端电压进行精确测量, 根据分压原理以及探测器输出电阻值与温度对应关系推导出温度变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知温控系统在达到目标温度后 30 s 时间内, 平均温度为 -45.01 ℃, 温度波动小于 ±0.02 ℃, 优于系统温差小于 ±0.1 ℃的要求。

## 5 结 论

红外探测器是气体检测仪器的的重要组成部分, 对于 CO 气体检测, 其吸收峰在 4.65 μm 处, 需要对 PbSe 红外探测器进行制冷控制, 温控的精度与稳定性将直接影响仪器检测指标。考虑到检测仪器实际工作环境与温控精度要求, 设计了基于专用温湿度控制芯片 ADN8830 的温控系统, 满足了 PbSe 探测器 -45 ℃低温工作需求的同时, 保证了温度的稳定性。根据设计方案搭建了实验测试系统, 对目标温度稳定性进行了实验验证。测试结果表明: 在目标温度为 -45 ℃条件下, 稳态过程温度波动优于 ±0.02 ℃, 上升时间 25 s, 满足 CO 气体检测仪器上升时间小于 30 s、稳态过程大于 1 min 的检测需求。

该温控系统不仅适用于本文所设计的 PbSe 红外探测器, 还可衍生应用于其他高精度温度控制场合, 且可以通过调节 PID 补偿电路部分改变温度控制动态响应参数, 具有广泛的商业、军工、航天应用前景。

## 参考文献:

- [1] Li Zhaozhou, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, et al. Temperature characteristics research of highprecision spectral radiometer standard detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 401-407(in Chinese).  
李照洲, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 高精度光谱辐射标准探测器的温度特性研究 [J]. *光学学报*. 2004, **24**(3):401-407.
- [2] Huang Yuewei, Cui Ruizhen, Gong Mali, et al. TEC based thermostat system for high-power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 143-147.
- [3] Shan Jiangdong, Wu Ge, Tian Xiaojian. Study on large time-delay constant temperature control system based on TEC [J]. *The Journal of China University of Posts and Telecommunications*, 2010, **17**(2): 32-35.
- [4] Zang Huai-quan, Li Qian. The automatic temperature system with fuzzy self-adaptive PID control in semiconductor laser [C]. *Shenyang, China: Proceedings of the IEE International Conference On Automation and Logistics*, 2009, 1691-1694.
- [5] Wang Hao, Yu Yonglin. Dynamic modeling of PID temperature controller in a tunable laser module and wavelength transients of the controlled laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2012, **48**(11), 1424-1431.
- [6] Zhang Shaofei, Guo Qiang, Wang Huijuan, et al. Design of temperature control system of diode laser based on ARM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(6): 995-998(in Chinese).  
张少飞, 郭强, 王会娟, 等. 基于 ARM 的半导体激光精确控温系统研制 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(6): 995-998.
- [7] Li Jiangan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(6): 1745-1749(in Chinese).  
李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(6): 1745-1749.

- [8] Zhang Quan, Huang Shuhua, Zhao Xin, *et al.* The design and implementation of CCD refrigeration system of imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0311004(in Chinese).  
张 泉, 黄书华, 赵 欣, 等. 机载成像光谱仪 CCD 制冷系统设计与实现 [J]. 光子学报, 2017, **46**(3): 0311004.
- [9] Fan Huimin, Zhang Aiwen, Hu Yadong, *et al.* Design of temperature control system for satellite-Borne multi-Channel shortwave infrared detectors [J]. *Journal of Atmosphere and Environmental Optics*, 2018, **13**(3): 233-240(in Chinese).  
范慧敏, 张爱文, 胡亚东, 等. 星载多路短波红外探测器温控系统设计 [J]. 大气与环境光学学报, 2018, **13**(3): 233-240.
- [10] Zhang Yanna, Zheng Xiaobing, Li Xin, *et al.* Design of temperature control of trap detector [J]. *Journal of Atmosphere and Environmental Optics*, 2013, **8**(1): 73-80(in Chinese).  
张艳娜, 郑小兵, 李 新, 等. 陷阱探测器温控装置的设计 [J]. 大气与环境光学学报, 2013, **8**(1): 73-80.
- [11] Wang Xiaoguang, Qian Xiaodong, Hong Jin, *et al.* High precision temperature control system of InGaAs multi-channel polarization detectors [J]. *Electronics Optics & Control*, 2016, **23**(5): 94-98(in Chinese).  
王晓光, 钱小东, 洪 津, 等. InGaAs 多路偏振探测器高精度温控系统 [J]. 电光与控制, 2016, **23**(5): 94-98.