

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2020.07.023

本文引用格式: 张冬, 李洪文, 邓永停, 等. 基于模型辨识的 CMOS 图像传感器热电制冷系统滑模控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(7): 162-169.

Citation format: ZHANG Dong, LI Hongwen, DENG Yongting, et al. Model Recognition Based CMOS Image Sensor Sliding Mode Control of Thermoelectric Refrigeration System[J]. Journal of Chongqing University of Technology( Natural Science) 2020, 34(7): 162-169.

# 基于模型辨识的 CMOS 图像传感器 热电制冷系统滑模控制

张冬<sup>1,2</sup>, 李洪文<sup>1</sup>, 邓永停<sup>1</sup>, 刘京<sup>1</sup>, 邵蒙<sup>1,2</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 刘昌华<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 100039)

**摘 要:** 为了提高 CMOS 图像传感器热电制冷系统的工作性能, 解决 CMOS 图像传感器工作时由于积热导致的暗电流问题, 提出了基于模型辨识的 CMOS 图像传感器热电制冷系统滑模控制方法。分析了 CMOS 图像传感器热电制冷系统的传热机理, 进而建立了 CMOS 图像传感器热电制冷系统在工作点附近的控制模型。针对辨识出的模型在不同工作点参数变化较大的问题, 设计了对 CMOS 图像传感器热电制冷系统参数变化不敏感的基于指数趋近律的滑模控制器, 以提高系统的鲁棒性。利用 Matlab/Simulink 对系统进行仿真分析, 仿真结果表明: 相比于传统的 PID 控制算法, 滑模控制方法的动态响应和稳态精度均更优。最后, 在实际的 CMOS 图像传感器热电制冷控制系统中进行了实验测试, 结果表明: 室温 20 °C 的条件下, 输入不同的温度指令滑模控制算法的稳态误差均小于 PID 控制算法, 为  $\pm 0.1$  °C, 满足 CMOS 图像传感器热电制冷控制系统的温控精度的要求。

**关 键 词:** 热电制冷; 温度控制; 滑模控制; 图像传感器

中图分类号: TP272

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2020)07-0162-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Model Recognition Based CMOS Image Sensor Sliding Mode Control of Thermoelectric Refrigeration System

ZHANG Dong<sup>1,2</sup>, LI Hongwen<sup>1</sup>, DENG Yongting<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>,  
SHA O Meng<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, LIU Changhua<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 100039, China)

收稿日期: 2019-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(11603024)

作者简介: 张冬, 男, 硕士研究生, 主要从事温度控制技术研究, E-mail: 2665668729@qq.com; 通讯作者 李洪文, 男, 博士, 研究员, 主要从事精密跟踪控制技术及电子学设计研究, E-mail: lihongwen1970@sohu.com。

**Abstract:** In order to improve the performance of CMOS image sensor thermoelectric refrigeration system and solve the dark current problem caused by accumulated heat when CMOS image sensor is working, a sliding mode control method for CMOS image sensor thermoelectric refrigeration system based on model identification is proposed. The heat transfer mechanism of the CMOS image sensor thermoelectric refrigeration system is analyzed, and the control model of the thermoelectric refrigeration system near the working point is established. Aiming at the problem that the identified model has large changes in parameters at different working points, a sliding mode controller based on exponential approach law which is insensitive to system parameter changes is designed to improve the robustness of the system. The simulation analysis of the system is carried out by using Matlab/Simulink. The simulation results show that the dynamic response and steady-state accuracy of the sliding mode control method are better than the traditional PID control algorithm. Finally, the experimental tests were carried out in the actual thermoelectric refrigeration system. The results show that the steady-state error of the input temperature command sliding mode control algorithm is less than the PID control algorithm at room temperature  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which is  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which satisfies the image sensor. The temperature control accuracy requirements of the refrigeration system.

**Key words:** thermoelectric cooling; temperature control; sliding mode control; image sensor

CMOS 图像传感器以其生产成本更低、功耗小等特点,在各种探测器、望远镜、航空航天等高精度探测领域得到广泛应用。但是 CMOS 图像传感器在长时间工作时,其焦平面会发热,加剧暗电流噪声。温度是影响暗电流的主要因素,随着 CMOS 图像传感器温度的升高,暗电流明显增大<sup>[1]</sup>。暗电流对于图像信号来说相当于噪声,它会干扰 CMOS 图像传感器成像,尤其是对于装备 CMOS 图像传感器进行高精度探测的探测器、望远镜等科学仪器,它们对成像质量要求高,对暗电流噪声十分敏感。因此对 CMOS 图像传感器进行制冷,抑制暗电流噪声,对用于高精度探测的探测器、望远镜等科学仪器提高成像质量与探测精度具有重大意义。

目前,CMOS 图像传感器的温度控制方式主要有储存式制冷和热电制冷<sup>[2]</sup>。储存式制冷是利用携带的低温液体或固体制冷剂,吸收设备的废热来进行制冷,制冷剂主要包括超流 He、液氮等。欧洲南方天文台的 OmegaCAM 探测器、云南天文台丽江观测站的 2.4 m 望远镜<sup>[3-4]</sup>均使用液氮制冷方式。储存式制冷具有制冷温度低、无系统部件震动的优点,但是受存储罐密封性的影响,该系统正常运行需要经常注入制冷剂,而且这种制冷方式机械结构尺寸大,可靠性差,难以精确地控制温度,不利于设计结构紧凑的测量系统,因此限制

了它的应用。热电制冷方式采用机械结构简单、热电制冷器(thermoelectric cooler, TEC)进行制冷<sup>[5-9]</sup>,TEC 无运动部件,因此不产生振动,工作可靠,不需要维护,这种制冷方式控制方便,因此越来越多的探测器采用这种方式制冷,如哈勃空间望远镜 HST 和詹姆斯·韦伯空间望远镜 JWST 等。本文的研究对象即 CMOS 图像传感器的热电制冷控制系统。

目前许多国内外学者对 TEC 的系统特性进行了研究。Goldsmid<sup>[10]</sup>论述了 TEC 材料对热电制冷器性能的影响,赵举等<sup>[11]</sup>对 TEC 的性能进行仿真和试验,定性分析了 TEC 的工作特性。吕相银等<sup>[12]</sup>对 TEC 的动态模型进行了分析和试验,但是没有给出针对特定 TEC 装置的具体模型。为了给系统控制器设计提供模型基础,本文拟采用模型辨识方法,以确定 CMOS 图像传感器热电制冷系统的模型。

为了保证对 CMOS 图像传感器热电制冷系统温度进行有效调节,必须设计可靠的温度控制算法。目前针对 CMOS 图像传感器热电制冷系统的温度控制主要采用 PID 控制算法<sup>[13-14]</sup>,但是热电制冷系统的是非线性系统,在不同工作点条件下系统模型存在较大变化, PID 控制算法在模型参数变化较大时不能对系统进行高精度控制。为了提

高 CMOS 图像传感器热电制冷系统的控制性能, 本文拟采用不依赖系统参数且鲁棒性强的滑模控制方法, 对热电制冷系统进行有效控制。

## 1 CMOS 图像传感器热电制冷系统模型分析与辨识

### 1.1 CMOS 图像传感器热电制冷系统模型分析

如图 1 所示, CMOS 图像传感器热电制冷系统由 TEC、连接到热侧的散热器和连接到冷侧的铜块、CMOS 图像传感器和真空杜瓦组成。本 CMOS 图像传感器制冷系统在 CMOS 图像传感器和热电制冷器之间嵌入一块导热性能好的铜块, 在铜块侧面转出一个盲孔到铜块的几何正中心, 将 PT100 温度传感器埋入盲孔中, 再用密封胶封住盲孔。铜的导热系数大, 导热性能好, 可以近似认为温度传感器在铜块中心测得的温度为 CMOS 图像传感器的温度。

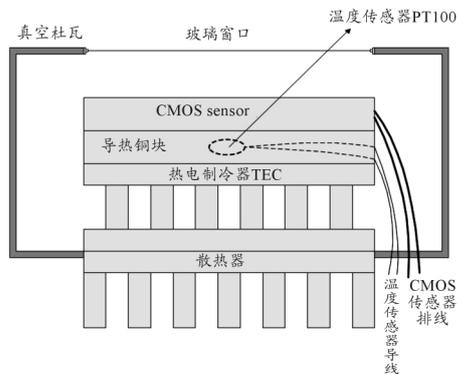


图 1 CMOS 图像传感器热电制冷系统结构图

假设冷端板和冷铜块内部温度分布均匀, 将冷端板与铜块的能量平衡作为一个整体来进行分析:

$$(M_L C_L + M_{Cu} C_{Cu}) \frac{dT_c}{dt} = Q_L - Q_k \quad (1)$$

其中:  $Q_L$  为冷端热负荷, 注入到热电制冷器冷端, 热负荷包括 CMOS 图像传感器的热功耗、热辐射等;  $M_L$  为 TEC 冷端板的质量;  $C_L$  为 TEC 冷端板的热容;  $M_{Cu}$  为与冷端板与 CMOS 图像传感器之间的铜块的质量;  $C_{Cu}$  为与冷端板与 CMOS 图像传感器之间的铜块的热容;  $T_c$  为热电制冷器冷端与铜块

温度;  $Q_k$  为具有  $N$  对 P、N 结的热电制冷器的制冷量,  $Q_k = NQ_c$ ;  $Q_c$  为一对 P、N 节的制冷量<sup>[15]</sup>:

$$Q_c = \alpha I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c) \quad (2)$$

其中:  $\alpha$  为铂尔帖系数;  $R$  为 P、N 结的总电阻;  $I$  为 P、N 结中的电流;  $T_h$  为热电制冷器热端温度。

$$Q_k = N(\alpha T_c I - K(T_h - T_c) - \frac{R I^2}{2}) \quad (3)$$

其中  $N$  为热电制冷器的 P、N 型半导体个数。

热电制冷器的制冷量与电流具有非线性关系, 但是可以认为在工作点附近具有线性关系<sup>[16]</sup>, 即:

$$Q_k = k_0 I \quad (4)$$

热负荷的传热速率与铜块温度  $T_c$  之间满足:

$$Q_L = \frac{T_c}{R_m}$$

其中  $R_m$  为图像传感器与铜块之间的热阻。

令

$$(M_L C_L + M_{Cu} C_{Cu}) R_m = T_0$$

$$k_0 R_m = K_0$$

则式(1)可以化简为

$$T_0 \frac{dT_c(t)}{dt} + T_c(t) = K_0 I(t) \quad (5)$$

因此式(5)为铜块和冷端板温度和热电制冷器电流之间的微分方程关系式, 其拉普拉斯变换为

$$G_1(s) = \frac{T_c(s)}{I(s)} = \frac{K_0}{T_0 s + 1} \quad (6)$$

可知, 在工作点附近, 铜块和冷端板温度与电流的关系为近似为 1 阶惯性环节。

如图 1 所示, 温度传感器 PT100 嵌入铜块的中心, 因此与铜块之间有热传导。当铜块的温度变化时, 温度传感器的温度不能马上达到铜块的温度, 温度的变化是动态过程。通过铜块热传导进入 PT100 传感器的热流为

$$Q_{Cu} = K(T_c - T) \quad (7)$$

传入 PT100 温度传感器的热量使其内能增加, 在  $\Delta t$  时间内温度的增量为  $\Delta T$ , 则根据能量守恒定律, 有:

$$Q_{Cu} \Delta t = C_{PT100} m_{PT100} \Delta T \quad (8)$$

写成微分形式为

$$C_{PT100} m_{PT100} \frac{dT}{dt} = K(T_c - T) \Rightarrow$$

$$C_{PT100} m_{PT100} \frac{dT}{dt} + KT = KT_c \quad (9)$$

因此温度传感器的温度与铜块和冷端板温度写成拉普拉斯变换的形式为

$$G_2(s) = \frac{T_c(s)}{T(s)} = \frac{K}{K + C_{PT100} m_{PT100} s} \quad (10)$$

因此温度传感器的传递函数模型为 1 阶惯性环节。综上所述。在工作点附近,热电制冷模块的模型为 2 个 1 阶惯性环节的乘积,即:

$$G(s) = G_1(s) G_2(s) \quad (11)$$

## 1.2 CMOS 图像传感器热电制冷系统模型参数辨识

本节主要设计实验获取系统输入输出的数据集,进行辨识试验。根据 CMOS 图像传感器制冷系统的工作条件确定辨识实验条件:① CMOS 图

像传感器热电制冷系统在室温环境温度下工作,因此本文选择在环境温度 20 °C 条件下进行辨识实验。② 系统的主要目的是维持在稳定的温度,因此试验选择经典辨识方法的阶跃信号作为系统的输入信号。③ 采样方法和采样间隔的选择,用 TP1000 无纸记录仪采样温度信息,由于 CMOS 图像传感器热电制冷系统的惯性大,温度响应慢,设置的采样间隔为 1 s。

### 1.2.1 数据获取

在本文中,使用杭州大和热磁公司的 9530228045 型号热电制冷器进行实验,它的极限工作电流为 4.5 A,因此本实验分别对 CMOS 图像传感器制冷系统输入幅值为 1 A、2 A、3 A、4 A 的阶跃电流信号( $r_1[t]$ 、 $r_2[t]$ 、 $r_3[t]$ 、 $r_4[t]$ ),用 TP1000 无纸记录仪采样温度信息,采样时间长度为 800 s 的离散的采样点,连接各采样点,得到的 CMOS 图像传感器热电制冷系统的阶跃响应曲线( $y_1[t]$ 、 $y_2[t]$ 、 $y_3[t]$ 、 $y_4[t]$ )如图 2 所示。

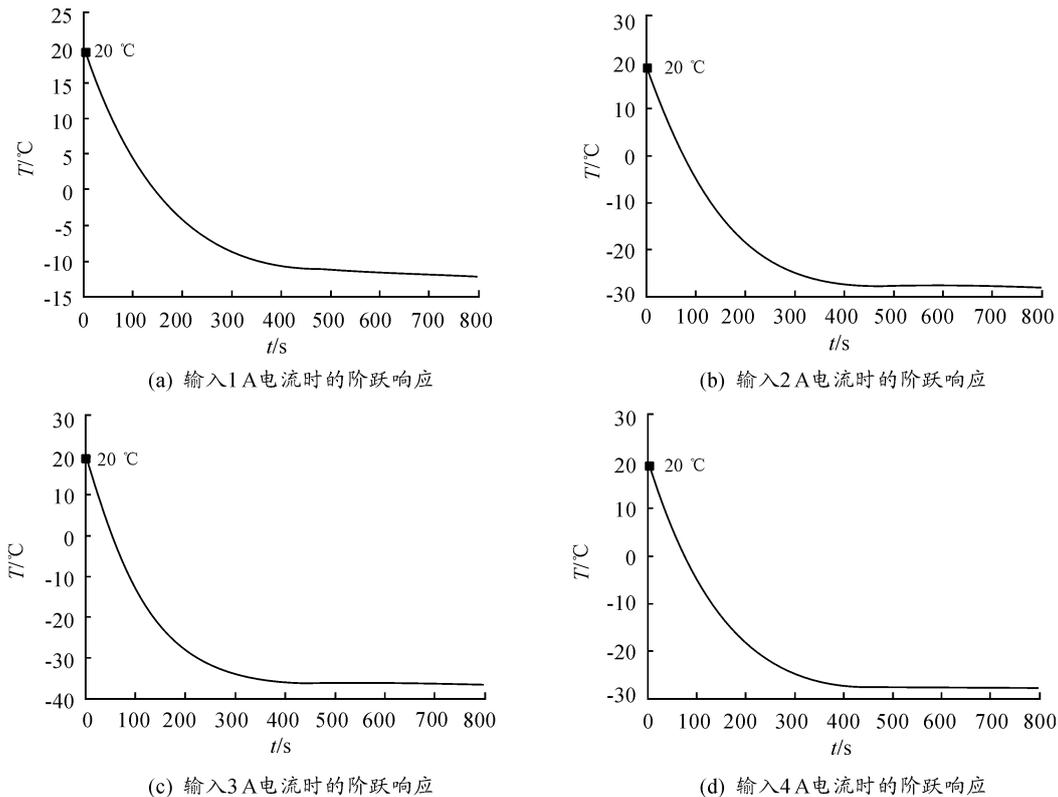


图 2 输入 1 A、2 A、3 A、4 A 电流时的阶跃响应

### 1.2.2 模型参数确定

利用 Matlab 的 System Identification Toolbox 工具箱 (System Identification Toolbox 工具箱利用最小二乘法确定系统参数) 分别对辨识实验采集的输入输出数据  $\{r1 [t], y1 [t]\}$ 、 $\{r2 [t], y2 [t]\}$ 、 $\{r3 [t], y3 [t]\}$ 、 $\{r4 [t], y4 [t]\}$  进行处理, 确定在不同输入电流下的 2 阶系统模型参数, 并对辨识结果进行验证, 得到响应曲线的拟合度高于 97%, 结果如表 1。

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

表 1 辨识结果

阶跃输入	K	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	拟合度/%
1 A	-11.963	113.52	75.37	98.91
2 A	-13.062	211.57	210.11	97.46
3 A	-11.862	162.02	161.48	97.53
4 A	-8.832 6	140.37	140.38	97.24

通过试验辨识的系统模型结果可以看出: 该 CMOS 图像传感器热电制冷系统在工作点附近可以将系统看成 2 阶线性系统。

## 2 滑模控制策略及仿真

为了实现对 CMOS 图像传感器热电制冷系统精确的温度调节, 必须设计可靠的控制算法。目前针对热电制冷系统的控制算法主要采用 PID 控制算法。但是通过第 1 节对 CMOS 图像传感器热电制冷系统模型的分析可知热电制冷系统是非线性系统, 而且随着工作点的不同, 模型参数变化较大, 而 PID 控制是非变结构控制, 不能在线改变控制器参数以适应被控对象的变化。为了实现对 CMOS 图像传感器温度较好的控制性能, 本节设计了不依赖系统参数、鲁棒性强的滑模控制方法, 并对 PID 控制方法与滑模控制方法进行仿真比较。

### 2.1 滑模控制策略

滑模控制是一种变结构控制, 可以根据系统的状态有目的地变化, 使系统按预定的滑动模态运动, 因此这种控制方法具有响应快、对系统参数

变化不敏感的特点。

为了减小静态误差, 选取积分型滑模面:

$$s = e + c\dot{e} \quad (12)$$

为了使系统状态快速到达滑模面, 选取指数趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \cdot \text{sign}(s) - k \cdot s \quad (13)$$

指数趋近律不仅可以使系统状态快速达到滑模面, 而且可以通过调整趋近律参数实现减小抖振的目的。

对  $s = e + c\dot{e}$  求导得到:

$$\dot{s} = \dot{e} + c\ddot{e} \quad (14)$$

根据第 1 节对制冷系统辨识可知系统是 2 阶模型, 即:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

即:

$$[T_1T_2s^2 + (T_1 + T_2)s + 1] \cdot Y(s) = K \cdot R(s) \quad (15)$$

变成微分方程的形式为

$$[T_1T_2 \frac{dy(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy(t)}{dt} + y(t)] =$$

$$K \cdot r(t) \Rightarrow \frac{dy(t)}{dt^2} + \frac{T_1 + T_2}{T_1T_2} \cdot \frac{dy(t)}{dt} +$$

$$\frac{1}{T_1T_2} \cdot y(t) = \frac{K}{T_1T_2} \cdot r(t)$$

$$\text{令} \begin{cases} A = \frac{T_1 + T_2}{T_1T_2} \\ B = \frac{1}{T_1T_2} \\ C = \frac{K}{T_1T_2} \end{cases}$$

则上式可化为

$$\frac{dy(t)}{dt^2} + A \cdot \frac{dy(t)}{dt} + B \cdot y(t) = C \cdot r(t)$$

即:

$$\ddot{y} + A \cdot \dot{y} + B \cdot y = C \cdot r \quad (16)$$

误差  $e = y_r - y$ , 式(14)可化为

$$\dot{s} = \dot{e} + c\ddot{e} = (\dot{y}_r - \dot{y}) + c(\ddot{y}_r - \ddot{y}) \quad (17)$$

阶跃输入时,

$$\begin{aligned}\dot{y}_r &= 0 \\ \ddot{y}_r &= 0\end{aligned}$$

将式(16)代入式(17)中得:

$$\begin{aligned}\dot{s} &= (\dot{y}_r - \dot{y}) + c(\ddot{y}_r - \ddot{y}) = -\dot{y} - c\ddot{y} = \\ &-\dot{y} - c(C \cdot r - A \cdot \dot{y} - B \cdot y)\end{aligned}\quad (18)$$

式(13)与式(18)存在恒等关系即:

$$\begin{aligned}\dot{s} &= -\dot{y} - c(C \cdot r - A \cdot \dot{y} - B \cdot y) = \\ &-\varepsilon \cdot \text{sign}(s) - k \cdot s\end{aligned}\quad (19)$$

根据上式可以得到控制律为

$$r = \frac{\varepsilon \cdot \text{sign}(s) + k \cdot s - \dot{y} + c \cdot A \cdot \dot{y} + c \cdot B \cdot y}{c \cdot C}\quad (20)$$

根据第1节对系统模型的辨识结果及系统的目标温度  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ , 选取第3组辨识结果作为仿真实验的系统模型, 因此可知  $A = 0.012365$ ,  $B = 3.822 \times 10^{-5}$ ,  $C = -0.0004534$ 。

## 2.2 仿真分析

当 CMOS 图像传感器热电制冷系统处于在  $20\text{ }^\circ\text{C}$  环境温度工作时, 分别输入  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-30\text{ }^\circ\text{C}$  的温度指令, 对系统采用 PID 控制策略和滑模控制策略的仿真结果如图3~5所示。

从图3、图4和图5中可以看出: 在  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  时, PID 控制算法的超调量为  $2.3\text{ }^\circ\text{C}$ , 而滑模控制算法的超调量为  $0.2\text{ }^\circ\text{C}$ ; PID 控制算法稳态误差为  $0.04\text{ }^\circ\text{C}$ , 而滑模控制算法的稳态误差为  $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。在  $-25\text{ }^\circ\text{C}$  时, PID 控制算法的超调量为  $2.6\text{ }^\circ\text{C}$ , 而滑模控制算法无超调量; PID 控制算法稳态误差为  $0.05\text{ }^\circ\text{C}$ , 而滑模控制算法的稳态误差为  $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。

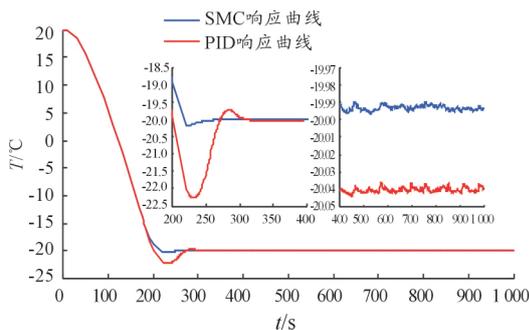


图3  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  指令时 PID 与 SMC 仿真响应曲线

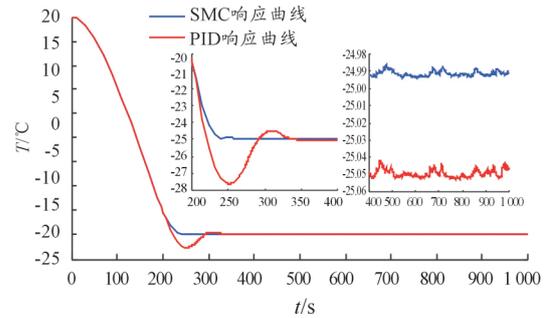


图4  $-25\text{ }^\circ\text{C}$  指令时 PID 与 SMC 仿真响应曲线

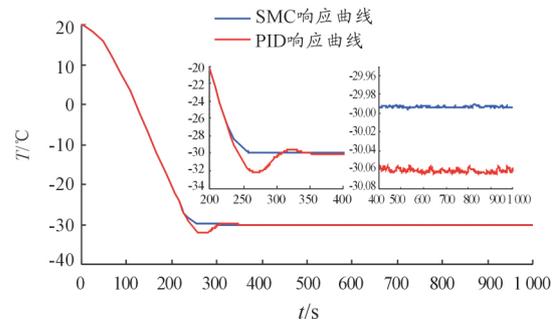


图5  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  指令时 PID 与 SMC 仿真响应曲线

在  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  时, PID 控制算法的超调量为  $2\text{ }^\circ\text{C}$ , 而滑模控制算法无超调量; PID 控制算法稳态误差为  $0.06\text{ }^\circ\text{C}$ , 而滑模控制算法的稳态误差为  $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。

综上所述, 在相同的输入温度设定情况下, 滑模控制算法的动态性能和稳态性能均优于 PID 控制方法; 随着输入设定温度降低, PID 控制算法稳态误差增大, 而滑模控制方法的稳态指标和动态指标几乎不变, 因此滑模控制算法由于传统的 PID 控制方法。

## 3 实验验证

### 3.1 实验平台组成

CMOS 图像传感器热电制冷控制系统结构框图如图6所示, 主要包括将图像采集模块封装在杜瓦罐内的热电制冷模块和以 TMS320F407 为控制核心的数字控制模块两部分。

热电制冷模块由热电制冷器、连接到热侧的散热器、连接到冷侧的铜块、CMOS 图像传感器、散热器与真空杜瓦罐组成。

数字控制模块包括以 TMS320F407 为控制核心的数字控制电路模块、以 PT100 温度传感器和 TI 公

司生产的 ADS1247 数模转换芯片为核心的温度采集电路模块、以 TI 公司的 4 个 CSD19534KCS (N - MOSFET) 及 LM5105 驱动芯片组成的 H 桥驱动电路模块、以及电源模块、上位机通信电路模块。

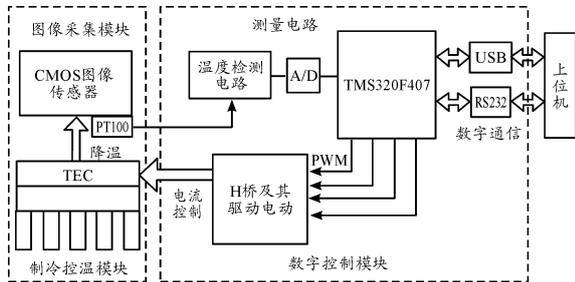


图 6 CMOS 图像传感器热电制冷系统组成示意图

### 3.2 实验及结果分析

为了验证滑模控制算法的有效性,本文对在 20 ℃ 工作的制冷系统进行实验测试与分析。首先利用真空泵将热电制冷模块的真空腔体抽真空,使真空腔内的气压达到 0.01 Pa,如图 8 所示。然后利用 CMOS 图像传感器热电制冷控制系统实验平台对传统 PID 和滑模控制算法的控制性能进行实验分析,如图 7 所示。



图 7 CMOS 图像传感器热电制冷控制系统实验平台实物

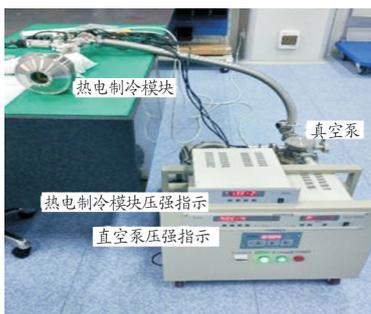


图 8 热电制冷模块抽真空装置

PID 控制方法的参数分别为  $k_p = 110, k_i = 3, k_d = 0.7$ 。滑模控制方法的参数分别为  $\varepsilon = 1, k = 1, c = 20$ 。分别对系统注入  $-20\text{ }^\circ\text{C}、-25\text{ }^\circ\text{C}、-30\text{ }^\circ\text{C}$  的温度指令,系统的响应温度曲线分别如图 9、图 10 和图 11 所示。

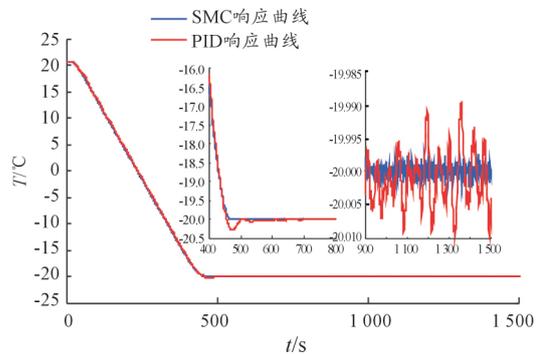


图 9  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  指令时系统响应曲线

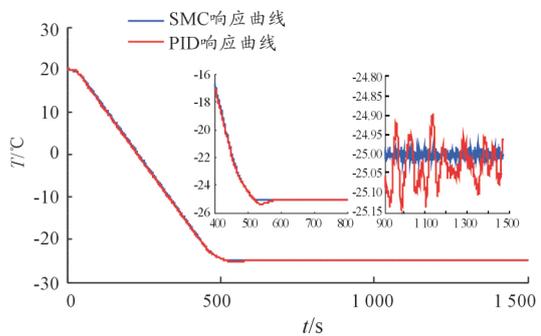


图 10  $-25\text{ }^\circ\text{C}$  指令时系统响应曲线

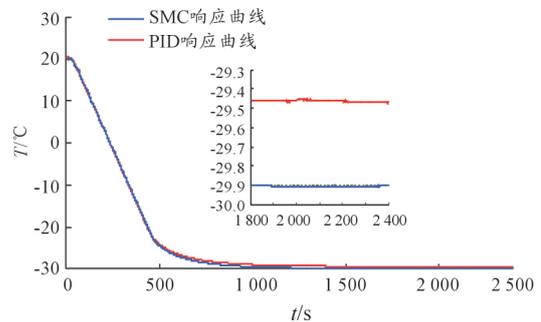


图 11  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  指令系统响应曲线

从图 9、图 10 和图 11 中可以看出:在  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  时,PID 控制算法的超调量为  $0.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,而滑模控制算法无超调量;PID 控制算法稳态误差为  $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,而滑模控制算法的稳态误差为  $\pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ ;在  $-25\text{ }^\circ\text{C}$  时,PID 控制算法的超调量为  $0.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,而滑模控制算法无超调量,PID 控制算法稳态误差为  $\pm 0.15\text{ }^\circ\text{C}$ ,

而滑模控制算法的稳态误差为  $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时 PID 控制算法无超调量, 滑模控制算法也无超调量, PID 控制算法稳态误差为  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而滑模控制算法的稳态误差为  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。输入制冷温度越低, PID 控制的温度误差越大, 而滑模控制的稳态误差变化较小。

综上所述, 实验结果与仿真结果相吻合。在相同的输入温度条件下, 滑模控制算法的温度控制性能优于 PID 控制方法。实验表明: 在室温条件下, 系统能达到输入的制冷温度, PID 控制方法稳态误差在  $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内, 滑模控制方法稳态误差在  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内, 满足系统的控制要求。

#### 4 结论

针对 CMOS 图像传感器热电制冷系统, 本文设计了一种基于模型辨识的滑模控制方法。首先在分析热电制冷模块机理的基础上辨识出系统模型; 辨识结果表明: 在工作的附近, CMOS 图像传感器热电制冷模块的输入电流与 CMOS 图像传感器温度之间可近似看作 2 阶系统。由于系统在不同工作点处参数变化较大, 依据辨识出的系统模型设计基于趋近律的滑模控制器, 以提高系统的鲁棒性。仿真与实验结果一致表明: 采用滑模控制方法的系统动态性能与稳态性能均优于 PID 控制, 在不同的输入电流情况下稳态精度在  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内, 满足系统的温度控制要求。

#### 参考文献:

- [1] RAMUZ M, BURGI L, WINNEWISSER C, et al. High Sensitivity Organic Photodiodes with Low Dark Currents and Increased Lifetimes [J]. *Org. Electron.* 2008; 9: 369 - 376.
- [2] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术原理及其应用

[M]. 中国科学技术出版社 2008: 278 - 293.

- [3] LIZON J L, SILBER A, JAKOB G. An hybrid liquid nitrogen system for the cooling of the ESO OmegaCAM detector [EB]. European Southern Observatory.
- [4] 赵连远, 许骏. 液氮杜瓦瓶热力与漏热分析 [J]. *天文研究与技术* 2008(3): 319 - 322.
- [5] 张婷婷, 王亚雄, 段建国. 热电制冷技术研究进展 [J]. *化学工程与装备* 2017(7): 226 - 228.
- [6] 刘华军, 李来风. 半导体热电制冷材料的研究进展 [J]. *低温工程* 2004(1): 32 - 38.
- [7] 王小群, 杜善义. 热电制冷技术在航空航天领域的应用 [J]. *中国航天* 2006(10): 22 - 24.
- [8] 职更辰, 王瑞. 热电制冷技术的进展及应用 [J]. *制冷*, 2012 31(4): 42 - 48.
- [9] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [10] GOLDSMID H J. Possibilities for Improvement in thermoelectric Modules(TECS).
- [11] 赵举, 朱洪亮, 仇和兵. 多级热电制冷器的 ANSYS 模拟与实验研究 [J]. *制冷* 2015 34(2): 36 - 40.
- [12] 吕相银, 杨莉, 凌永顺. 半导体制冷表面温度的动态特性 [J]. *低温工程* 2006 154(6): 45 - 47.
- [13] 孙森, 申利梅, 张腾, 等. 热电冷却半导体激光器的温控策略研究 [J]. *工程热物理学报* 2018 39(7): 1417 - 1423.
- [14] 丛山, 张大宇, 常明超, 等. 基于半导体制冷的星载 CCD 测试用低温环境装置设计 [J]. *航天器环境工程*, 2019 36(1): 95 - 102.
- [15] 程攀. 天文卫星相机焦平面制冷系统的设计与实现 [D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所) 2012.
- [16] 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.

(责任编辑 何杰玲)