

基于 ADRC 的高精度红外热成像仪 温度控制系统设计

董荣伟

(盐城工业职业技术学院, 江苏 盐城 224005)

摘要: 为了可以更加精准地控制红外热成像仪温度, 设计一种基于 ADRC 的高精度红外热成像仪温度控制系统; 由系统供电模块、探测器驱动模块、模数转换模块、视距估算模块、视频信号处理模块、外部存储模块、以太网传输模块和温度控制模块组成温度控制系统; 利用自抗扰控制设计一种单轴控制器, 将由时延带来的不确定性建模作为系统综合扰动的一部分, 对扩张状态观测器以及总和扰动展开估计, 同时在前馈通道对其展开补偿, 消除时延对控制器产生的影响, 将控制器应用于红外热成像仪温度控制中, 获取高精度的红外热成像仪温度控制结果; 通过实验分析证明, 设计系统的帧频、响应波段、启动时间、供电范围和功耗测试结果分别为 55 Hz、11 μm 、3.4 s、12 VDC 和 0.56 W, 具有良好的红外热成像仪温度控制性能, 可以满足提取高质量的红外图像的要求。

关键词: ADRC; 高精度; 红外热成像仪; 温度控制系统

Design of Temperature Control System for High Precision Infrared Thermal Imager Based on ADRC

DONG Rongwei

(Yancheng Polytechnic College, Yancheng 224005, China)

Abstract: In order to control the temperature of infrared thermal imagers more accurately, a high-precision infrared thermal imager temperature control system based on active disturbance rejection control (ADRC) is designed. The temperature control system is composed of system power supply module, detector driver module, analog-to-digital conversion module, line of sight estimation module, video signal processing module, external storage module, Ethernet transmission module, and temperature control module. The ADRC is used to design a single axis controller, the uncertainty caused by time delay is taken as a part of the system comprehensive disturbance. The expanded state observer and total disturbance are estimated, and are compensated in the feedforward channel to eliminate the impact of time delay on the controller. The controller is applied to the temperature control of infrared thermal imagers and obtain high-precision temperature control results. Through experimental analysis, the results show that the frame rate, response band, startup time, power supply range, and power consumption of the designed system are 55 Hz, 11 μm , 3.4 s, 12 VDC, and 0.56 W, respectively. It has a good temperature control performance of infrared thermal imagers, and can meet the requirements of extracting high-quality infrared images.

Keywords: ADRC; high precision; infrared thermal imager; temperature control system

0 引言

红外热成像仪^[1-2]是一种利用红外辐射能量来检测目标物体表面的温度分布、运动状态及表面结构的设备。它具有非接触性及高分辨率两大特点, 被广泛应用于各种工业现场的测量与控制领域。但在实际应用过程中, 环境中的其他红外辐射源、电磁干扰、光线干扰等都可能影响红外热成像仪的测量结果, 为此, 需要对其实施温度控制, 以提高红外热成像仪的精度。

张安迪等^[3]将单片机作为核心控制元件, 热电制冷器

以及 PCT 加热器作为执行元件, 引入论域可变的模糊比例—积分—微分控制算法输出不同占空比的脉冲宽度调制波, 进而达到温度控制的目的。姜炎坤等^[4]利用 COMSOL 软件展开有限元分析, 同时确定热结构, 对芯片展开实时温度数据采集, 最终引入线性自抗扰算法对 PWM 波展开调整, 实现温度控制。周冬冬等^[5]主要利用 Matlab 软件建立 Smith-模糊 PID 温度控制系统, 引入 FFRLS 算法对全部数据展开辨识, 最终实现温度控制。

自抗扰控制器是一种针对非线性系统的控制方法, 具

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-01-25。

基金项目: 盐城市重点研发计划(农业)项目(YCBN202310); 2022 年江苏省产学研合作项目(BY20221388); 2021 年盐城工业职业技术学院科研基金项目(ygy2107)。

作者简介: 董荣伟(1989-), 男, 硕士生, 讲师。

引用格式: 董荣伟. 基于 ADRC 的高精度红外热成像仪温度控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 162-168, 175.

有抗扰动性能强、适用范围广、跟踪性能好、鲁棒性强和易于实现等。自抗扰控制器可以有效地提高非线性系统的控制精度和稳定性，使其在复杂的环境条件下保持较好的性能表现。为了进一步提高红外热成像仪的温度控制能力，在上述研究的基础之上，设计一种基于 ADRC 的高精度红外热成像仪温度控制系统。通过具体的实验分析证明，所提系统具有良好的温度控制性能。

1 红外热成像仪温度控制系统硬件设计

红外热成像仪^[6-7]的图像分辨率和清晰度受限于温度分辨率，即其检测到的最小温度差异。如果目标物体的温度差异较小，红外热成像仪可能无法准确测量，且在电磁等干扰下，无法准确测量目标物体的温度。为了解决这些缺陷，需要对红外热成像仪进行温度控制。通过温度控制，可以保持探测器的温度稳定，提高红外热成像仪的灵敏度和精度，减少干扰因素的影响，并确保测量结果的准确性。此外，温度控制还可以防止设备过热或过冷，从而延长其使用寿命。红外热成像仪的工作原理如图 1 所示。

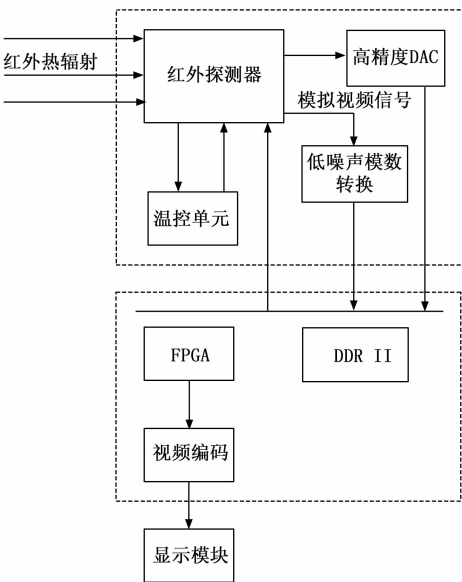


图 1 红外热成像仪工作原理图

通过分析图 1 可知，红外热成像仪在成像过程中需要体现的不仅是被测目标的热辐射特性以及红外焦平面探测器的响应特性，同时还会涉及红外信号的大气传输效应以及红外光学镜头的损耗等，人眼最终获取的红外图像是上述因素共同作用的结果。通过红外热成像仪工作原理展开红外热成像仪温度控制系统硬件部分设计，对应的组成架构如图 2 所示。

由图 2 可知，红外热成像仪温度控制系统硬件部分主要由系统供电模块、探测器驱动模块、模数转换模块、视距估算模块、视频信号处理模块、外部存储模块、以太网传输模块和温度控制模块组成，各个模块的具体功能如下所示。

1.1 系统供电模块

电源是红外热成像仪温度控制系统中比较关键的一个



图 2 红外热成像仪温度控制系统硬件部分组成架构图

部分，良好的电源网络可以有效提升系统的整体效率。对于红外热成像仪而言，为了有效避免总噪声对系统产生的负面影响，需要对电源网络展开优化处理。系统供电模块组成框架如图 3 所示。

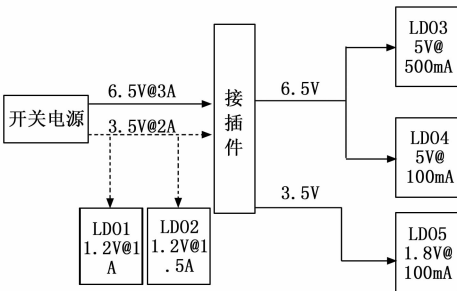


图 3 系统供电模块组成框架

在图 3 系统供电模块组成框架中，首先加入低通滤波器，以减小电源噪声对系统的影响，低通滤波器可以有效地抑制高频噪声，提供稳定的直流电压，从而提高系统的稳定性。然后，采用稳定的电源芯片，保证系统在不同工作条件下都能提供稳定的电压。同时，为了防止电源故障对系统产生影响，设计备份电源，确保系统的持续稳定运行。最后，在电源模块中加入保护电路，如过流保护、过压保护和短路保护等。当电源出现异常情况时，保护电路可以迅速切断电源，以避免对系统造成损害。基于系统结构及原理分析的基础之上，获取红外热成像仪技术参数如表 1 所示。

1.2 探测器驱动模块

探测器驱动模块在红外热成像仪中起着至关重要的作用，其设计理念是为了实现对探测器的精确控制，包括驱动时序和配置寄存器的设置。通过合理设计和优化，可以提高探测器的工作效率和性能。该模块主要产生探测器的驱动时序以及配置寄存器，配置数据的传输时序如图 4 所示。根据实际需求设定配置字长度，同时向探测器开始传输，并且为了更好地完成图像处理，还需要设定像素时钟以及 SCL 频率。当完成配置设定后，需要给探测器发送 OCC 参数，完成相关配置后，根据探测器的运行可以确定模拟图像波形。

表 1 红外热成像仪技术参数

主要特性	技术参数名称	取值
系统特性	NETD	$\leq 90\text{ mK at F/0.70}$
	探测器参数	$320\times 240(\text{Vox Microbolometer})$
	帧频	$30\sim 70\text{ Hz}$
	响应波段	$10\sim 16\text{ }\mu\text{m}$
	探测器类型	非制冷红外焦面
物理特性	工作温度	$-35\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$
	尺寸	$40\text{ nm}\times 40\text{ nm}\times 30\text{ nm}$
	重量	$\leq 80\text{ kg}$
输出特性	输出视频	模拟视频和数字视频
电源特性	启动时间	低于 5 s
	供电范围	$8\sim 18\text{ VDC}$
	功耗	$\leq 1\text{ W}$

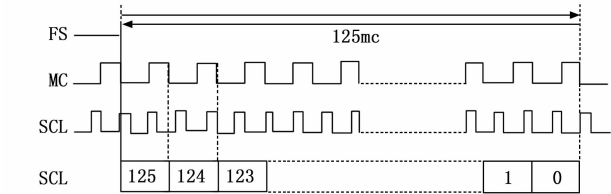


图 4 探测器配置数据传输序列示意图

通过图 4 所示探测器配置数据传输序列，产生合适的驱动时序，该时序能够有效地激发探测器的敏感区域，使其能够正确地感应红外辐射，并将其转换为电信号。

为了控制探测器的操作模式和数据传输方式，探测器驱动模块需要设置相应的配置寄存器。寄存器主要包括控制字寄存器、像素格式寄存器、数据传输速率寄存器等。通过设置这些寄存器的值，可以实现对探测器的精细控制和优化。

为了进一步提高数据传输的准确性和稳定性，探测器驱动模块需要根据系统的需求设定像素时钟和 SCL（System Clock）频率。通过像素时钟同步像素数据的传输，利用 SCL 频率控制整个系统的运行速度和稳定性。

1.3 温度控制模块

温度控制模块是通过探测器内部电阻的温度特性探测目标，所以红外热成像仪中探测器的温度控制对于整个系统都有十分重要的影响，需要尽可能让红外焦平面阵列中像元的自身基准温度处于平稳状态，确保红外热成像系统的成像质量得到有效提升，并且降低红外图像预处理的难度，从根本上改善红外图像质量，同时实时对探测器内部温度以及环境温度展开测量，使其可以更好地调整系统的工作状态。其中，温度控制模块结构示意图如图 5 所示。

在图 5 温度控制模块中，热敏电阻是一种能够根据温度变化改变电阻值的元件。在温度控制模块中，热敏电阻被用来监测探测器的温度，并将该信息传递给控制系统。用户可以通过温度设置输入设定探测器的目标温度。控制系统会根据设定的温度和实际测得的温度之间的差异来调

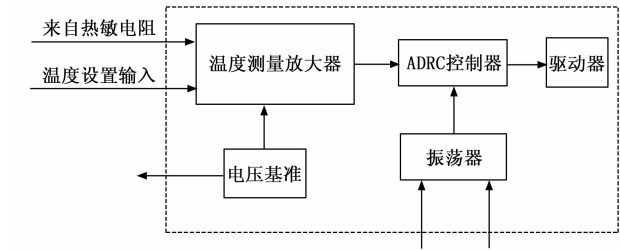


图 5 温度控制模块结构示意图

整探测器的加热器，以实现温度的精确控制。

电压基准—温度测量放大器用于放大热敏电阻输出的电压信号，并将其转换为对应的温度值，是实现精确温度控制的关键之一。

振荡器产生一个振荡信号，该信号被用于控制加热器的开关频率。通过调整振荡器的频率，可以控制加热器的功率输出，进而实现对探测器温度的精确控制。

ADRC 控制器是一种用于处理非线性系统的控制算法，它可以对系统进行快速和精确的控制。在这个模块中，ADRC 控制器用于调整加热器的功率输出，以实现精确的温度控制。驱动器则用于驱动加热器，使其能够根据控制器的指令调整功率输出。

1.4 模数转换模块

模数转换模块是连接探测器以及后端处理模块的重要组成部分，会对最终的成像质量产生一定程度的影响。所以需要分别展开单端转差分电路和 PCB 设计，同时还需要对 ADC 差分输入范围展开验证。整个模块的组成架构图如图 6 所示。

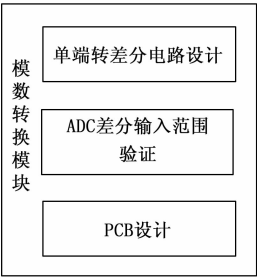


图 6 模数转换模块结构示意图

图 6 模数转换模块是红外热成像仪温度控制系统中不可或缺的一部分，它负责将探测器输出的模拟信号转换为数字信号，以便后端处理模块进行进一步的处理和分析。

单端转差分电路是将单端输入的模拟信号转换为差分输出的数字信号的关键部分。为了确保信号的完整性和可靠性，考虑电路的阻抗匹配、信号噪声和失真等因素。此外，对单端转差分电路进行适当的滤波和放大，以优化信号的质量和稳定性。

模数转换模块中的 ADC（Analog-to-Digital Converter）是核心部分，它负责将模拟信号转换为数字信号。在设计模数转换模块时，首先对 ADC 的差分输入范围进行验证，以确保其能够正确地接收和转换来自探测器的模拟信号。

PCB (Printed Circuit Board) 是实现模数转换模块功能的重要载体。在 PCB 设计中, 主要考虑信号的完整性、电源的质量和稳定性、以及布局和布线的合理性等因素。为了优化信号的质量和稳定性, 可采取适当的滤波、去耦、屏蔽等措施。

1.5 视距估算模块

作用距离是红外热成像仪中的一个重要参数, 当利用红外热成像仪获取图像的过程中, 需要考虑大气环境以及目标背景特性等因素对图像产生的影响。所以, 展开估算是十分必要的。其中, 整个模块的使用步骤如下所示:

- 1) 确定计算模式为大气透过率计算还是视距估算, 需要根据实际需求展开波段选择;
- 2) 如果为大气透过率计算, 用户输入所需要的数据后, 直接点击“大气透过率”即可完成计算; 如果为视距计算, 则直接点击“视距计算”, 利用迭代的方式确定最远距离;
- 3) 如果选择的是视距估算模式, 系统会根据当前的大气条件以及目标的背景特性进行迭代计算, 从而确定最远的可检测距离;
- 4) 无论是大气透过率还是视距估算结果, 系统都会以图形或数字的形式提供给用户, 以使用户了解当前条件下的仪器性能。

1.6 视频信号处理模块

视频信号处理模块结构示意图如图 7 所示。

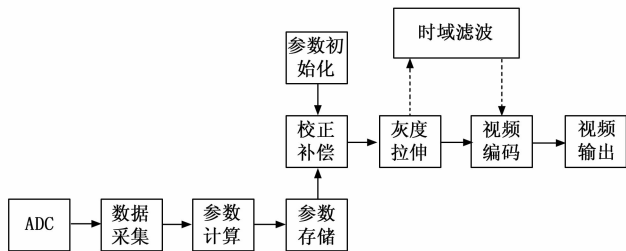


图 7 视频信号处理模块结构示意图

优先通过 FPGA 采集 ADC 转换的数字信号, 读取 ROM 中存储的校正数据, 同时对原始数据展开盲点以及非均匀性校正, 经过拉伸将原始图像映射到对应的灰度空间内。如果获取的图像内存在噪声比较大的问题, 则直接引入时域滤波对其展开滤波^[8-9]处理。

1.7 外部存储模块

在采集红外图像的过程中, 需要采用存储器来缓存采集到的红外图像以及一些校正参数, 外部存储模块的主要作用就是存储图像和数据。考虑到红外图像的大小, 需要选择具有足够存储容量且性能良好的存储设备, 为此使用具有高存储容量的 EXCERIA PLUS G2 NVMe 固态硬盘 (SSD) 进行存储, 如图 8 所示。

同时, 为了确保存储设备能够满足实时图像采集的需求, 应选择读写速度较快的存储设备。为了实现实时图像采集和数据处理, 需要确保外部存储模块具有较高的数据传输速度, 选择 USB 3.0 支持高速数据传输的接口, 提高

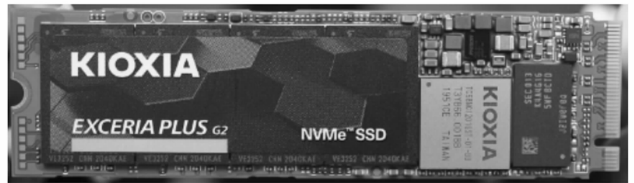


图 8 EXCERIA PLUS G2 NVMe 固态硬盘

数据处理效率。在处理敏感数据或重要信息时, 数据的安全性和可靠性至关重要。因此, 选择具有高可靠性和稳定性的 RAID 阵列存储设备, 并采取必要的安全措施, 提高数据的安全性。

1.8 以太网传输模块

以太网传输模块主要是由寄存器子模块以及存储管理子模块等组成, 主要通过以太网实现图像以及数据的传输工作^[10-11], 使其可以以更高的效率完成传输。

以太网传输模块的硬件设计主要包括适合网络传输的物理接口, 为 USB 转以太网接口, 以实现与控制系统的连接。同时, 为了确保数据传输的稳定性和可靠性, 在该模块中放置了具有高速数据传输能力的 DM9000CIEPDM9000 封装 QFP-48 以太网控制器芯片, 如图 9 所示。



图 9 视频信号处理模块结构示意图

以太网传输模块的软件设计主要包括数据包的封装和解析、网络连接的管理以及数据传输的调度等功能。此外, 增加了加密和校验措施, 确保数据传输的安全性。

2 基于 ADRC 的高精度红外热成像仪温度控制方法

自抗扰控制器 (ADRC, active disturbance rejection control) 是一种非线性控制方法。ADRC 旨在通过估计和补偿系统中的总扰动, 实现对复杂非线性系统的精确控制。主要由跟踪微分器、扩展状态观测器和非线性状态误差反馈控制律组成。

跟踪微分器是 ADRC 的核心组成部分之一, 它用于实现对设定值的快速跟踪。跟踪微分器通过引入一个滤波器, 将设定值与实际输出值之间的误差转化为具有适当增益的信号, 以实现快速跟踪。

扩展状态观测器 (ESO, extended state observer) 是 ADRC 的另一个重要组成部分。ESO 用于估计系统中的总扰动, 包括外部扰动、内部模型误差和未建模动态等。ESO 通过对系统状态进行扩展观测, 估计出系统状态变量和总扰动, 并

对其进行补偿, 以实现对系统扰动的精确补偿。

非线性状态误差反馈控制律是 ADRC 的另一个重要组成部分。该控制律根据系统状态变量和非线性反馈控制律的组合, 实现对系统扰动的精确控制。非线性状态误差反馈控制律的设计需要考虑系统特性和性能要求, 以确保系统具有较好的鲁棒性和动态性能。

考虑到基于 ADRC^[12-13] 的高精度红外热成像仪温度控制系统的实际需求, 将软件部分可以划分为 3 个阶段。

1) 第一阶段: 将 PC 机作为控制中心, 对目标图像的运行轨迹展开实时分析, 确定参考轨迹点。

2) 第二阶段: 通过采样周期, 伺服器利用 CAN 总线实时采集目标图像位置, 将获取的信息传输给嵌入式控制器, 控制器可以将接收到的信息展开协议封装处理, 同时利用以太网将数据传输至 PC 机, 同时记录各个时间段的数据。

3) 第三阶段: 当 PC 机接收到数据包后, 需要对全部数据展开解析处理, 通过计算确定各个时段的控制量, 将其直接传输至控制器中, 由控制器传输到伺服器。

在实际应用过程中, 分析高精度红外热成像仪温度控制方式, 确保控制器以及执行器之间可以实时响应, 同时各个伺服轴也可以同步。对于红外热成像仪而言, 由于网络时延的存在, 导致多轴同步具有一定的难度。将整个系统的控制总时延表示为公式 (1) 的形式:

$$t_d = t_a + t_b + t_c \quad (1)$$

式中, t_a 代表执行器的反馈时延; t_b 代表执行器的网络传输时延; t_c 代表程序处理时延。

将红外热成像仪的运行周期设定为 10 s, 通过公式 (2) 确定执行器接收到的控制量 $s_i(t)$:

$$s_i(t) = \begin{cases} s_i(t_{d-1}), & t_k \in t_d \\ s_i(t_d), & t_k \in t_{d+1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, t_k 代表第 k 个采样时刻。

结合上述分析, 将带有时变短时延的离散化单轴系统模型表示为公式 (3) 的形式:

$$\begin{cases} u_{i1}(k+1) = u_{i1}(k) + pu_{i2}(k) \\ u_{i2}(k+1) = c_{(h,p)}s_i(t) + \frac{f_{i1}}{f_{i2}}(c_{(h,p)} - 1)u_{i1}(k) + \frac{f_{i1}}{f_{i2}}(c_{(h,p)} - 1)^2u_{i2}(k) \\ r_i(k) = u_{i1}(k+1) + u_{i2}(k+1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $u_{i1}(k)$ 和 $u_{i2}(k)$ 代表目标的位置和速度状态量; p 代表采样周期; $c_{(h,p)}$ 代表系统受到外界干扰的程度; f_{i1} 和 f_{i2} 代表系统的驱动模式; $r_i(k)$ 代表系统控制量输入。结合公式 (3), 可以将系统综合扰动扩张处理, 进而形成全新的状态向量 u_{i3} , 如公式 (4) 所示:

$$u_{i3} = f_{i1} + f_{i2} \frac{r_i(k)}{p} u_{i2}(k-1) \quad (4)$$

考虑到红外热成像仪温度控制的真实需求, 优先需要展开稳定的单轴红外热成像仪温度控制, 同时设计基于 ADRC^[14-16] 的单轴红外热成像仪温度控制器, 如图 10 所示。

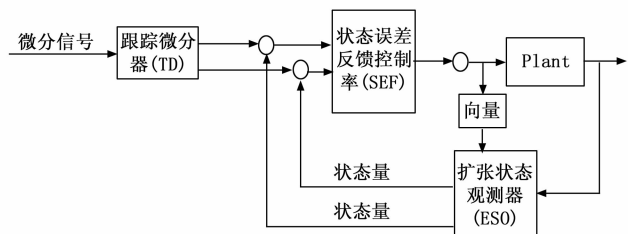


图 10 基于 ADRC 的单轴红外热成像仪温度控制器结构示意图

将基于 ADRC 的单轴红外热成像仪温度控制器设计过程划分为 3 个阶段, 分别为:

1) 优先设定目标跟踪微分控制器, 根据红外热成像仪温度控制需求确定过渡过程, 并且设定参考输入为控制器的单轴期望轨迹。在实际控制过程中, 如果期望转速值不为零, 则会造成控制误差偏大。需要利用跟踪微分器可以合理安排过渡过程, 获取有效的过渡信号。将线性跟踪微分器 $h_m(k)$ 表示为公式 (5) 的形式:

$$\begin{cases} h_m(k) = a_{i1}(k+1) - a_{i2}(k+1) \\ a_{i1}(k+1) = a_{i1}(k) + h_m(k)u_{i3} \\ a_{i2}(k+1) = h_m(k)[a_{i1}(k) - a_{i2}(k)]^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $a_{i1}(k)$ 和 $a_{i2}(k)$ 代表状态量; $h_m(k)$ 代表转速近似的微分信号。

2) 通过上述分析, 展开扩张状态观测器设计, 同时对总和扰动展开实时估计 $\beta_{iz}(t)$, 将其表示为公式 (6) 的形式:

$$\beta_{iz}(t) = \frac{h_m(k) \cdot (a_{i1}(k), a_{i2}(k))}{r_i(k)} \quad (6)$$

3) 设计状态误差反馈控制律, 同时利用公式 (7) 求解控制量 $q_z(t)$ 。对于上述对总扰动的估计, 将求解的控制量减去 $\beta_{iz}(t)$, 即可获取全新的控制量, 可以将其作用于红外热成像仪中, 有效消除时延对系统性能产生的影响:

$$q_z(t) = \frac{\beta_{iz}(t), u_{i2}(k)}{a_{i1}(k), a_{i2}(k)} - h_m(k) \quad (7)$$

完成基于 ADRC 的单轴红外热成像仪温度控制器设计后, 需要在前馈通道对控制器展开补偿处理 R_d , 消除时延对控制器产生的影响, 控制性能得到进一步提升, 如公式 (8) 所示:

$$R_d = q_z(t) \left(\cos\theta + \frac{e_x}{2R} \right) + \left(\sin\theta - \frac{e_x}{2R} \right) \quad (8)$$

式中, θ 代表近似误差; R 代表控制器对应的增益系数; e_x 代表控制器的补偿量输出。将基于 ADRC 的控制器应用于红外热成像仪温度控制中, 使其可以有效控制红外热成像仪的温度, 确保其可以获取高质量的图像。

3 实验结果与分析

为了验证基于 ADRC 的高精度红外热成像仪温度控制系统的有效性, 需要在不同测试场景下展开实验测试。系统界面如图 11 所示。

设置自抗扰控制算法的参数如下: 微分增益—2.5; 积分时间—3.2; 观测器增益—5.1; 滤波参数—4.8; 非线性



图 11 系统界面

增益—4.1。

3.1 实验步骤和方法

- 1) 准备实验设备：准备红外热成像仪、温度控制模块、数据采集设备、计算机等实验设备，并确保设备处于正常工作状态；
- 2) 搭建实验平台：将红外热成像仪放置在测试环境中，连接温度控制模块和数据采集设备，构建完整的实验平台；
- 3) 设定实验参数：根据实验需求，设定红外热成像仪的参数，如表 1 所示；
- 4) 启动实验：启动红外热成像仪和温度控制模块，开始实验；
- 5) 采集数据：通过数据采集设备采集红外热成像仪的温度数据，并记录下不同时间点的温度值。同时，记录下温度控制模块的输入和输出数据；
- 6) 分析数据：对采集到的数据进行处理和分析，比较不同系统在温度控制方面的性能；
- 7) 得出结论：根据实验结果，得出所提基于 ADRC 的高精度红外热成像仪温度控制系统的性能表现结论。

3.2 实际测试结果参数表

选择部分参数与设计后系统的测试结果进行比较，具体如表 2 所示。

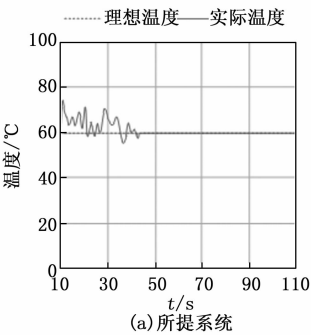
表 2 实际测试结果

参数名称	取值	实际测试结果
帧频	30~70 Hz	55 Hz
响应波段	10~16 μm	11 μm
启动时间	低于 5 s	3.4 s
供电范围	8~18 VDC	12 VDC
功耗	≤1 W	0.56 W

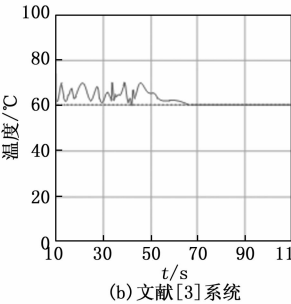
由表 2 所示，设计系统的实际测试结果均在取值范围内，表明设计系统具有良好的控制能力。这是因为设计系统的自抗扰控制算法准确地估计和补偿了系统中的总扰动、外部扰动、内部模型误差和未建模动态等因素，从而实现了精确的温度控制。

3.3 温度控制性能分析

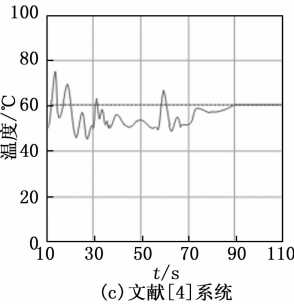
为了验证所提系统的优越性，设定红外热成像仪的最佳成像温度为 60℃，通过不同系统对红外热成像仪展开温度控制，实验结果如图 12 所示。



(a) 所提系统



(b) 文献[3]系统



(c) 文献[4]系统

图 12 不同系统的红外热成像仪温度控制结果比较

通过分析图 12 可以看出，通过所提系统可以以最快的速度使红外热成像仪温度达到最佳状态，充分证明所提系统的控制性能明显优于其它系统。这是因为设计系统采用了 ADRC 算法，该算法能够准确估计和补偿系统中的总扰动，包括外部扰动、内部模型误差和未建模动态等，从而实现精确的温度控制。与对比控制算法相比，ADRC 算法具有更强的适应能力，能够快速响应和抑制扰动，提高控制系统的稳定性和性能。

3.4 温度控制效果分析

为了进一步验证各个系统对红外热成像仪温度控制效果的好坏，分析不同场景下各个系统成像效果的好坏，实验结果如图 13 所示。

分析图 13 可知，采用所提系统对红外热成像仪温度控制处理后，红外图像质量明显更好；而通过两种系统对红外热成像仪展开温度控制后，获取的红外图像存在模糊不清和细节不完善等问题。由此可见，所提系统具有良好的红外热成像仪温度控制效果。这是因为设计系统中的跟踪微分器和扩展状态观测器的参数经过合理选择和优化，能够快速跟踪期望温度轨迹并准确估计扰动，从而有效补偿系统中的干扰，提高温度控制的效果。

3.5 温度控制响应时间分析

了解温度控制系统的响应时间可以帮助我们理解和优化系统的性能。在许多应用中，快速且准确的温度控制是实现良好性能的关键因素。例如，在某些需要快速响应的红外成像应用中，如果温度控制响应时间太长，可能导致图像模糊或错过关键的实时信息。基于此，各个控制系统的响应时间如图 14 所示。

由图 14 可以看出，各个系统对应的控制响应时间会随着样本数量的增加呈现上升趋势。但是和另外两种系统相

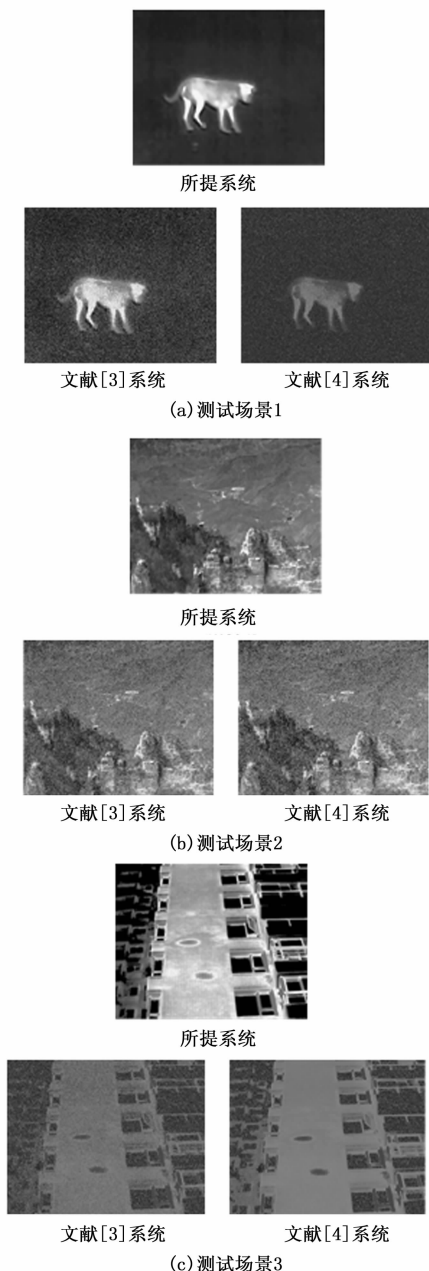


图 13 不同控制系统的红外图像质量比较

比, 所提系统的控制响应时间明显更低一些, 说明所提系统中加入 ADRC 展开红外热成像仪温度控制是有效且可行的, 可以获得更加满意的控制效果, 同时还能够有效降低控制响应时间。且设计系统中的非线性状态误差反馈控制律能够根据系统状态变量和非线性反馈控制律的组合, 实现对系统扰动的精确控制, 提高控制效率。

4 结束语

针对当前温度控制系统存在的一系列问题, 设计一种基于 ADRC 的高精度红外热成像仪温度控制系统。温度控制系统硬件设计主要由系统供电模块、探测器驱动模块、模数转换模块、视距估算模块、视频信号处理模块、外部存储模块、以太网传输模块和温度控制模块组成。根据红

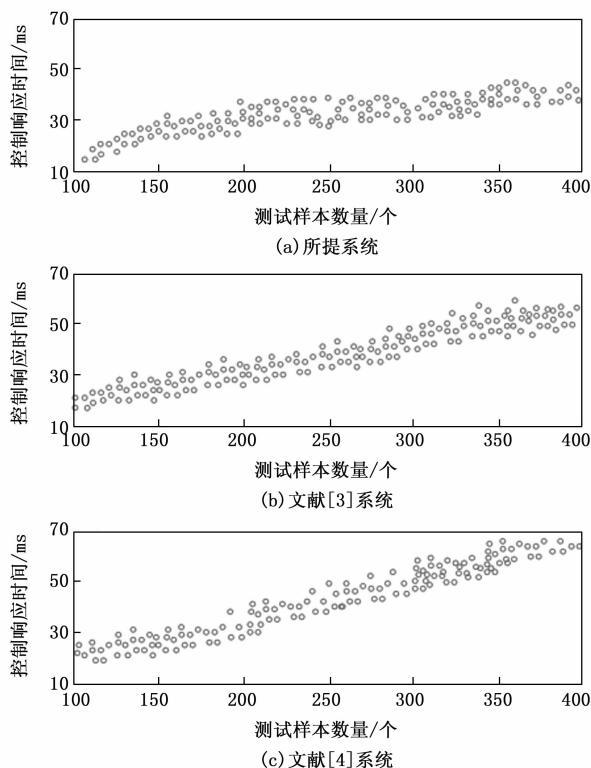


图 14 不同系统的控制响应时间实验结果比较

外热成像仪温度控制的需求, 确定目标温度的过渡过程, 并设定参考输入为期望的温度轨迹, 使用扩展状态观测器估计系统中的总扰动, 借助非线性状态误差反馈控制律, 结合系统状态变量和非线性反馈控制律的组合, 实现对系统扰动的精确控制, 根据实际需求和系统响应, 对控制器的参数进行调整和优化, 以提高控制系统的性能和稳定性。和已有的温度控制系统相比, 所提系统可以有效控制红外热成像仪温度, 获取高质量的红外图像, 同时还可以有效降低控制响应时间, 得到高精度的红外热成像仪温度控制结果。

参考文献:

- [1] 习小文, 苏清风, 袁雅妮, 等. 超声红外热成像技术在航空发动机叶片裂纹的对比研究 [J]. 红外技术, 2021, 43 (2): 186-191.
- [2] 钟明霞, 姜柏军. 红外热成像技术在 ADAS 系统中的应用 [J]. 激光与红外, 2022, 52 (5): 721-725.
- [3] 张安迪, 张艳荣, 李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用 [J]. 光学学报, 2021, 41 (12): 153-161.
- [4] 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): 296-301.
- [5] 周冬冬, 陈明霞, 赵金迪. 基于 FFRLS 辨识优化橡胶挤出机 Smith-模糊 PID 温度控制系统 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (15): 158-165.

(下转第 175 页)