

文章编号: 1001-3806(2023)04-0534-07

## 便携式高速多光谱辐射测温仪的研制

李梦奇, 杨明庆, 牛春晖\*, 刘大通

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:** 为了解决传统多光谱辐射测温仪便携性差和无法测量瞬变温度的问题, 采用分光光纤和带通滤光片的分光方法, 设计了高速光电响应电路, 研制了一台便携式高速多光谱辐射测温仪。结果表明, 使用光纤和带通滤光片代替传统的棱镜分光, 并与其它硬件封装在一起, 可降低系统的复杂度, 提高仪器的便携性, 组装后仪器总体质量不大于 4 kg, 体积不大于 30 cm×25 cm×25 cm; 设计高带宽的光电转换电路并使用高速模数转换芯片、现场可编程门阵列芯片及 CYUSB3014 芯片进行数字信号的采集和传输, 与计算机的通信速率高达 100 MHz, 使得测温仪能够测量微秒级变化的温度; 在参考温度稳定的情况下, 测温相对误差低于±2.5%, 测温精度较高。这些结果对于提高测温仪的便携性和实现瞬变温度场高精度测温是有帮助的。

**关键词:** 测量与计量; 便携式高速测温仪; 高带宽电路; 现场可编程门阵列; 高速数字信号处理

**中图分类号:** TN247; TH811 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.04.014

## Development of portable high-speed multi-spectral radiation thermometer

LI Mengqi, YANG Mingqing, NIU Chunhui, LIU Datong

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Science and Technology Information, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of poor portability and inability to measure transient temperature of traditional multi-spectral radiation thermometers, a portable high-speed multi-spectral radiation thermometer was developed by adopting the spectroscopic method of splitting fiber+band-pass filter, and a high-speed photoelectric response circuit was designed. The results show that, the complexity of the system can be effectively reduced and the portability can be improved by using optical fiber and band-pass filter to replace the traditional prism and package it with other hardware of the thermometer. After assembly, the overall mass of the instrument is not more than 4 kg, and the volume is not more than 30 cm×25 cm×25 cm. The photoelectric conversion circuit with high bandwidth was designed, and the high-speed analog digital conversion chip, field-programmable gate array chip and CYUSB3014 chip were used for digital signal acquisition and transmission. The communication rate with the computer is up to 100 MHz, so that the thermometer can measure the temperature with microsecond change. The actual temperature measurement results of muffle furnace temperature after calibration show that the overall relative error of the thermometer is less than ±2.5% and the temperature measurement accuracy is high when the reference temperature is stable. This result is helpful to improve the portability of the thermometer and realize the high-precision temperature measurement of transient temperature field.

**Key words:** measurement and metrology; portable high-speed thermometer; high-bandwidth circuit; field-programmable gate array; high-speed digital signal processing

### 引言

在工业生产和军事国防等领域中时常需要获取高温目标的温度, 如在激光毁伤、爆炸物爆炸和航天器发

射实验中<sup>[1-3]</sup>。获取温度的方式多种多样, 按照测温装置是否接触被测目标可分为接触式测温和非接触式测温两种<sup>[4-5]</sup>。接触式测温设备通常是利用某材料的物理或电学原理工作的, 如热电偶测温、示温漆测温 and 晶体测温等, 该测温方法存在对温度变化响应慢、测温过程长、容易破坏被测目标温度场等问题<sup>[6]</sup>。非接触式测温法则是通过测量高温物体辐射能量从而反演出目标真实温度的方法, 具有精度高、速度快和不破坏被

作者简介: 李梦奇 (1997-), 男, 硕士研究生, 现主要从事多光谱辐射测温的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: niuchunhui@bistu.edu.cn

收稿日期: 2022-05-17; 收到修改稿日期: 2022-06-14

测目标温度场的优点。多光谱辐射测温是非接触式测温中应用最广泛的一种,具有对被测对象无特殊要求、测温精度高等特点<sup>[7]</sup>。

实际应用中,不同的测温场景对多光谱辐射测温技术要求不同。如在对爆炸火焰测温过程中要求测温仪的响应速度要快,光电转换模块能够捕捉到爆炸火焰的辐射信息并传给信号处理单元进行处理,通常爆炸燃烧时间为毫秒级别<sup>[8]</sup>,这对测温仪光电响应速度和数据高速处理能力提出了很高的要求。又如在钢铁冶炼的连铸过程中,由于参与性物质(水雾)和铸坯表面氧化物的存在<sup>[9]</sup>,往往需要寻找铸坯表面无水汽和其它杂质覆盖物的部位进行测温,这就要求测温仪具有便携性,方便测量人员携带测温仪寻找新的测温点进行测温。而传统测温仪器的光学元件经过瞄准和调焦后位置就随之固定,一旦移动,就需要重新安装对焦,费时费力,影响测温,所以设计一种同时具有便携性与高速测温能力的多光谱辐射测温仪很有必要。

根据上述需求,本文中研制了一套多光谱辐射测温仪,采用以下方法实现便携性和高速测温:(1)使用光纤+带通滤光片完成分光,相较于传统的闪耀光栅或色散棱镜分光光路<sup>[10]</sup>,具有质量轻、光能损失小和传播过程不受杂散光干扰等优点,降低了系统光路的复杂度;(2)将各功能模块的硬件封装在一起,减少了仪器的体积,提高了集成度和便携性;(3)设计以光电二极管为核心的高带宽光电转换模块<sup>[11]</sup>,来代替成本高昂、响应速度慢的光电传感器<sup>[12-13]</sup>,保证高带宽的同时还降低了成本;(4)利用 AN9238 模数转换模块+现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)芯片+USB3.0 通信协议完成数据的高速并行模数(analog digital, AD)转换、采集和传输,拥有高速度的同时还能保证各通道的辐射信息能在同一时刻采集<sup>[14]</sup>。

本文作者将从多光谱辐射测温理论、测温仪硬件结构、人机交互软件设计、测温实验等方面进行阐述。

## 1 多光谱辐射测温理论

由基于参考温度的数学模型<sup>[15]</sup>可知,假设多光谱辐射测温仪有  $n$  个通道,则第  $i$  个通道的输出信号  $V_i$  可以表示为:

$$V_i = A_{\lambda_i} \cdot \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot \frac{1}{\lambda_i^5 \{ \exp[ C_2 / (\lambda_i T) ] - 1 \}} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_i$  指的是第  $i$  个通道下的波长,  $A_{\lambda_i}$  为检定常数;  $\varepsilon(\lambda_i, T)$  为温度  $T$  时的目标光谱发射率;  $C_2$  为第二辐

射常数。为了方便处理,用维恩公式代替普朗克定律,可以将(1)式改写为:

$$V_i = A_{\lambda_i} \cdot \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda_i T}\right) \quad (2)$$

在定点黑体(发射率为 1)参考温度  $T'$  下,第  $i$  个通道的输出信号  $V_i'$  可以表示为<sup>[16]</sup>:

$$V_i' = A_{\lambda_i} \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda_i T'}\right) \quad (3)$$

将(2)式和(3)式作比并取对数后可得:

$$\ln\left(\frac{V_i}{V_i'}\right) - \frac{C_2}{\lambda_i T'} = -\frac{C_2}{\lambda_i T} + \ln\varepsilon(\lambda_i, T) \quad (4)$$

将发射率函数  $\ln\varepsilon(\lambda_i, T) = \sum_{i=0}^m a_i \lambda_i^i$  代入上式后得:

$$\ln\left(\frac{V_i}{V_i'}\right) - \frac{C_2}{\lambda_i T'} = -\frac{C_2}{\lambda_i T} + a_1 \lambda_i + a_2 \lambda_i^2 + \dots + a_m \lambda_i^m + a_0 \quad (5)$$

式中,  $a_i$  表示的发射率函数各项之前的系数。在稳定的参考温度  $T'$  下,列出方程组并求解,求得温度  $T$ 。

输出信号  $V_i$  反映了高温目标不同波段下光辐射信息的强弱,获取  $V_i$  的过程本质上是把不同波段下的光信号转换成电压信号,由于获取到的  $V_i$  值是模拟信号,不能够直接传给计算机,所以还需要将模拟信号转换成数字信号。综上所述,想要获得能被计算机处理的  $V_i$  就需要设计和借助相应的硬件,从而实现分光、模数转换和数据传输的功能。

## 2 测温仪硬件结构

测温仪的硬件主体是由外壳、分光光纤、光电转换电路板、AD 转换模块和 FPGA 数据采集与传输模块组成,结构图如图 1 所示。

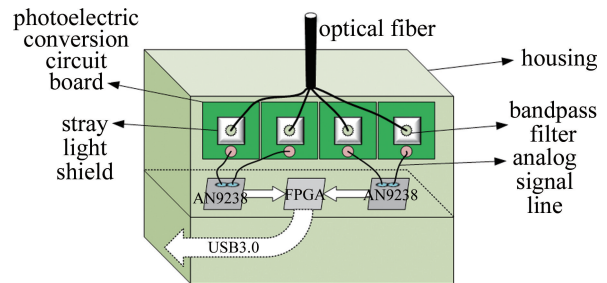


图 1 测温仪结构图

Fig. 1 Structure diagram of thermometer

分光光纤的作用是接收高温目标的光辐射信息并将其传给各波长通道,过程中需要注意屏蔽环境杂散光;光电转换电路板的功能是把光信号转换成电流信号,并利用跨阻放大器转换成电压信号和进一步放大,

设计时需要考虑带宽和增益;AN9238 可以将模拟信号转换成数字信号,之后 FPGA 芯片再将数字信号通过 USB3.0 端口发送给上位机进行处理。

## 2.1 机械结构的设计与制作

多光谱辐射测温仪的工作环境通常较为恶劣,为了保护仪器里的分光光纤和印制电路板(printed circuit board,PCB),使用铝合金材质制作仪器的外壳,同时金属壳体具有一定的电磁屏蔽作用<sup>[17]</sup>,可以减少外界的杂散信号对高速信号处理电路造成的干扰。

实体图如图 2 所示。图 2a 为壳体外观图,图 2b 为内部结构图。测温仪外壳形状为长方体,内部有一个金属隔板,隔板一侧用来安装 AD 转换模块和 FPGA 数字信号采集传输模块的 PCB 板,另一侧用来盘放光纤;壳体后侧有定位螺丝孔,用来固定光电转换模块的 PCB 板;正面和两侧为光纤、电源线和信号线预留了孔洞。

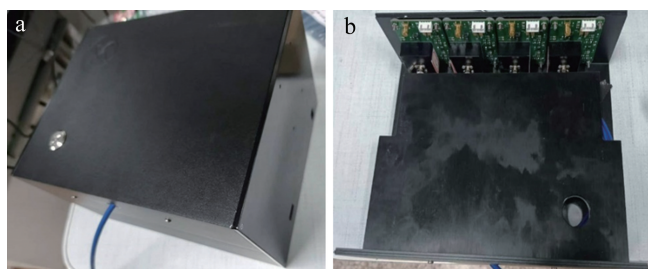


图 2 测温仪实体图

Fig. 2 Physical picture of thermometer

## 2.2 光电转换模块

2.2.1 分光模块的设计 光电转换电路 PCB 板上安装有杂散光屏蔽罩,屏蔽罩内部镶嵌了带通滤光片(通带中心波长分别为 0.78  $\mu\text{m}$ 、0.85  $\mu\text{m}$ 、0.98  $\mu\text{m}$  和 1.064  $\mu\text{m}$ ),带通滤光片使用的是大恒光电生产的 GCC-2020 系列可见光和近红外干涉滤光片,滤光片的有关参数如表 1 所示。

表 1 滤光片参数

Table 1 Parameters of filter

parameter	value
center wavelength deviation	$\pm 2 \text{ nm}$
half bandwidth	$10 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$
peak transmittance	410 nm~515 nm $\geq 50\%$ ; 520 nm~1550 nm $\geq 55\%$
cut-off depth	$< 0.01\%$
center wavelength shift	$< 0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$

分光光纤使用的是上海闻奕光电科技有限公司生产的可见-近红外宽带透光石英光纤,透光波段为 400 nm~2500 nm,为 1 分 7(即 1 个入射端,7 个出射

端)耦合分光光纤。将分光光纤的出射端接到杂散光屏蔽罩上,被测高温目标发出的辐射光经过滤光片后就得到了特定波段的光。

2.2.2 光电转换电路的设计 光电转换电路包括电源模块、光电二极管、跨阻放大电路模块<sup>[18]</sup>、信号放大电路模块和低通滤波模块。

电源模块需要为跨阻放大器、发光二极管(light-emitting diode,LED)指示灯提供稳定、低波纹的电压,选择德州仪器公司生产的 TPS7A3001 和 TPS7A4901 低压差线性稳压器为跨阻放大器提供  $\pm 2.5 \text{ V}$  电压,为 LED 指示灯提供 2.5 V 电压。选择 LSSPD-1.2 Si 光电二极管和 LSIPD-L1 InGaAs 光电二极管作为感光元件,硅型光电二极管在 0.4  $\mu\text{m}$ ~0.9  $\mu\text{m}$  的响应度高,将其应用在 0.78  $\mu\text{m}$ 、0.85  $\mu\text{m}$  通道上;铟镓砷型光电二极管在 0.9  $\mu\text{m}$ ~1.7  $\mu\text{m}$  的响应度高,将其应用在 0.98  $\mu\text{m}$ 、1.064  $\mu\text{m}$  通道上。两种二极管的相关参数如表 2 所示。

表 2 感光元件参数

Table 2 Parameters of photosensitive element

	active diameter/mm	response time/ns	dark current/pA	saturated optical power/mW
LSSPD-1.2	1.2	1.4	0.2	15
LSIPD-L1	1	10	0.1	8

跨阻放大电路模块选用的跨阻放大器为亚德诺半导体公司的 LTC6268,该放大器增益带宽积高达 500 MHz,可以在高增益的情况下拥有较高的带宽<sup>[19]</sup>,后续的放大电路也使用该运放。滤波器选择 RC 无源低通滤波器,目的是为了滤除高频杂波信号。

为满足测量微秒级别变化温度的要求,需要电路 -3 dB 带宽不小于 1 MHz。反馈电阻  $R_f$  的最大取值可以由下式计算:

$$R_f = G_{\text{GBP}} / (2\pi \cdot C_s \cdot f_{-3 \text{ dB}}^2) \quad (6)$$

$$C_s = C_d + C_c + C_{\text{diff}} \quad (7)$$

式中,  $G_{\text{GBP}}$  表示 LTC6268 的增益带宽积(gain bandwidth product, GBP),为 500 MHz;  $f_{-3 \text{ dB}}$  表示带宽为 -3 dB 时的频率;  $C_s$  为运放前端寄生电容;  $C_d$  为光电管的寄生容值;  $C_c$  为芯片输入的寄生共模容值;  $C_{\text{diff}}$  为芯片输入的寄生差分容值。查阅元件手册后算得  $C_s = 50.55 \text{ pF}$ ,代入(6)式后求得  $R_f$  最大取值为 1.6 M $\Omega$ ,为了保证足够高的带宽,将  $R_f$  设置为 10 k $\Omega$ 。

为了避免运算放大器产生自激,需要设置反馈电容  $C_f$  进行补偿,  $C_f$  的最小取值可由下式计算:

$$C_f = \sqrt{C_s / (R_f \cdot G_{\text{GBP}} \cdot \pi)} \quad (8)$$



将  $C_s = 50.55 \text{ pF}$ ,  $R_f = 10 \text{ k}\Omega$  和  $G_{\text{GBP}} = 500 \text{ MHz}$  代入上式, 计算后得  $C_f$  最小取值约为  $3.2 \text{ pF}$ , 为了保证系统稳定, 将  $C_f$  设置为  $5 \text{ pF}$ 。

$RC$  低通滤波器的截止频率可由  $f = 1/(2\pi RC)$  进行计算, 设置截止频率为  $6 \text{ MHz}$ , 则电阻  $R$  和电容  $C$  的取值分别为  $5 \text{ }\Omega$  和  $5 \text{ nF}$ 。光电转换电路组成和各元器件数值选型如图 3 所示。AC (alternating current) 是指该电流源为交流电流源。

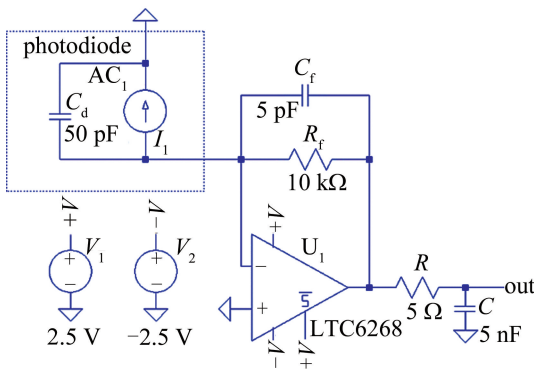


图 3 光电转换电路原理图

Fig. 3 Schematic of photoelectric conversion circuit

为了测试电路的上升时间和放大倍数是否满足设计要求以及输出波形是否正常, 给电路输入脉宽  $0.2 \text{ }\mu\text{s}$ , 幅值  $1 \text{ nA}$  的电流信号进行脉冲响应测试, 结果如图 4a 所示; 同时为了测量电路带宽, 将光电流大小设置为  $1 \text{ nA}$  后进行交流分析, 结果如图 4b 所示。

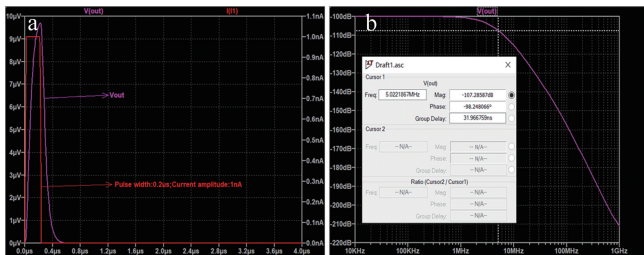


图 4 电路分析

Fig. 4 Circuit analysis

观察图 4a 的脉冲响应波形  $V_o$ , 可以发现输出波形正常, 上升时间约为  $1.7 \text{ }\mu\text{s}$ , 且不存在振荡和过冲,  $1 \text{ nA}$  的电流经过跨阻放大电路后成为了  $10 \text{ }\mu\text{V}$  的电压, 放大倍数正常; 图 4b 显示电路的带宽可以达到  $5 \text{ MHz}$ , 足以满足微秒级测温的需求。

2.2.3 PCB 板设计与制作 印制电路板 (printed circuit board, PCB) 板设计需要考虑到漏电流、寄生电容和尺寸问题。

由于跨阻放大器的增益较大,  $\text{nA}$  级别的漏电流就会影响到输出电压, 所以在布局时应采用“一靠近、二

远离”的规则, 即光电二极管的管脚靠近运放的输入端, 电源线和信号线远离输入端。

由于需要放大微小的光电流, 跨阻放大器的反馈电阻阻值很大, 大阻值的电阻端对端会存在寄生电容, 间接增大了反馈电容, 从而影响电路整体的带宽, 解决办法是在反馈电阻焊盘之间放置接地走线, 如图 5 所示, 达到屏蔽产生该电容的电场通路的效果, 从而减少电阻端对端寄生电容。为了尽可能地减小 PCB 板的面积, 选择使用贴片形式的电阻和电容, 最终 PCB 板尺寸为  $50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。

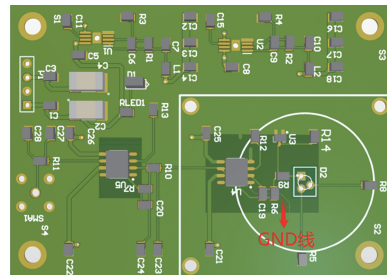


图 5 光电转换模块 PCB 图

Fig. 5 PCB diagram of photoelectric conversion module

### 2.3 数据采集与传输模块

数据采集与传输模块包括模数转换、数据采集和缓存以及数据传输 3 个部分。

模数转换模块使用的是黑金高速 AD 模块 AN9238, 此模块采用了 ADI 公司的 AD9238 芯片, 有 2 路 AD 转换通道, 采样数据位为 12 位, 采样速率最高可达  $65 \times 10^6/\text{s}$ <sup>[20]</sup>。已知光电转换模块最高带宽为  $5 \text{ MHz}$ , 根据香农采样定理, 将采样频率设置为  $10 \text{ MHz}$ , AN9238 足够满足要求。

使用 FPGA 芯片实现数据的并行采集、缓存和时序控制, 芯片型号为 Cyclone IV E: EP4CE10F17C8。FPGA 芯片为 AN9238 模块提供  $10 \text{ MHz}$  的时钟信号, 同时以  $50 \text{ MHz}$  的速度将采集的 4 路数字信号写入到先进先出 (first input first output, FIFO) 存储器里, 为了区别 4 路信号, 将 48 bit 数据缓存到 FIFO 存储器之前会每隔 12 bit 加入 4 bit 的识别位, 具体的数据格式为: {0001, channel 1, 0010, channel 2, 0100, channel 3, 1000, channel 4}, 所以每次被写进 FIFO 存储器的数据位宽为 64 bit。

Cypress 公司生产的 CYUSB3014 USB3.0 接口芯片可以进行高速数据传输, 它提供的通用可编程接口 (general programmable interface, GPIF), GPIF II 支持 32 位并行数据总线, 工作时钟信号大小为  $100 \text{ MHz}$ , 可以由 FPGA 芯片经过 (phase lock loop, PLL) 锁相环生

成<sup>[20]</sup>。FPGA 芯片与 GPIF II 接口框图如图 6 所示。SLCS#信号为芯片片选信号,必须激活;PKTEND#信

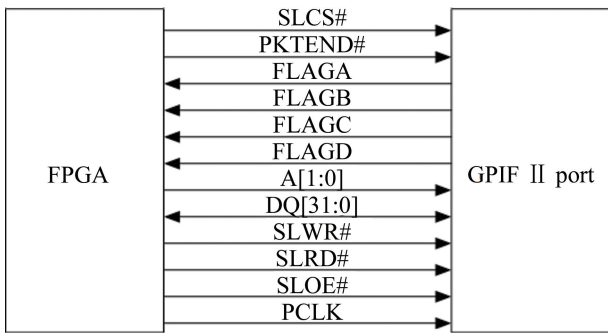


图 6 FPGA 与 GPIF II 接口图

Fig. 6 Interface diagram between FPGA and GPIF II

号激活后可以给接口发送短数据包;FLAGA、FLAGB、FLAGC、FLAGD 为芯片的标志输出;A[1:0]是接口的地址总线;DQ[31:0]为 32 位数据总线;SLWR#/SLRD#是写入/读取选通信号,激活后可对接口执行写/读操作;SLOE#为输出使能信号,激活后才可以执行读操作;PCLK 为时钟信号。

当 FPGA 内部 FIFO 存储器的半满标志位有效的时候,FPGA 芯片会控制 FIFO 存储器每次读出 32 bit 的并行数据,通过 GPIF II 接口将数据写进 USB3.0 芯片内部的数据缓冲区,之后芯片通过固件程序将数据发送给上位机进行后续处理。总体原理框图如图 7 所示。

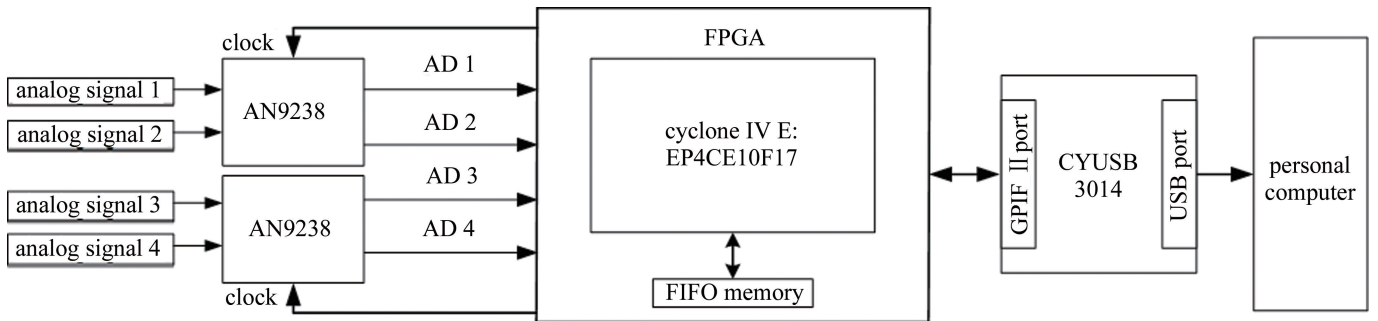


图 7 数据采集与传输模块原理框图

Fig. 7 Schematic of data acquisition and transmission module

### 3 人机交互软件设计

人机交互软件的编写是基于 C#编程语言编写的,开发工具使用的是 Visual Studio。C#是基于 .NET 框架下的文本型编程语言,相较于 LabVIEW 来说,C#集成了大量类库,开发效率高,程序界面和微软系统外观配合好,而且不会像 LabVIEW 一样存在低版本无法打开高版本编写的程序等兼容性问题。软件整体界面如图 8 所示。



图 8 人机交互窗口

Fig. 8 Interactive interface

整体界面分为 3 个区,界面左半部分为“温度显示区”,右上端为“操作区”,右下端为“数据显示区”。点击“连接设备”后,程序会自动检测 USB3.0 端口是否连接成功,否则会提示设备未连接;端口连接成功后,点击“开始采集”,程序就会开始接收数据,每次接

收 64 bit 并显示在“接收数据”窗口。接收到的数据会按照识别位被分成 4 路,转成十进制后显示在“第 1 路数据”...“第 4 路数据”窗口,同时程序也会将接收到的数据带入到算法中计算并将结果显示在“温度显

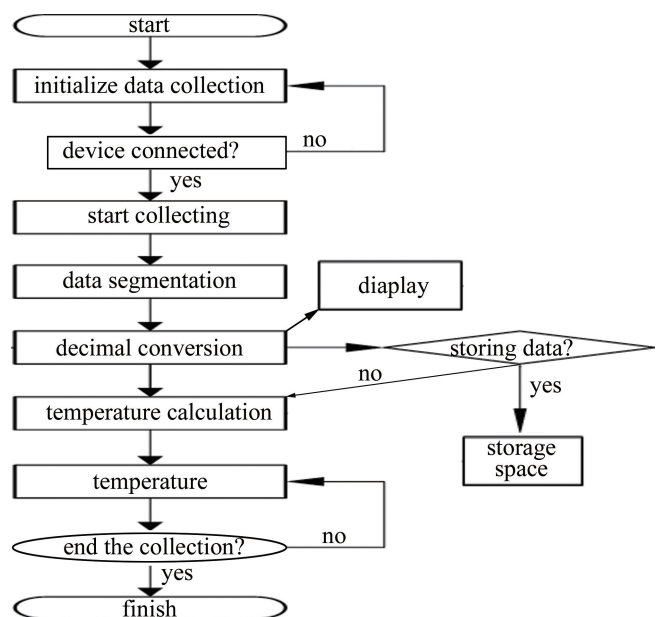


图 9 软件工作流程图

Fig. 9 Flow chart of software operation

示区”。点击“存储数据”按钮会将接收到的数据存储到指定存储位置,方便日后分析。软件的工作流程图如图 9 所示。

## 4 测温实验

### 4.1 仪器标定

由第 1 节中的内容可知,仪器需要一个稳定标准辐射源进行标定,标定过程中要求参考温度  $T'$  稳定。选取两个参考温度点  $T_1' = 1323$  K 和  $T_2' = 1373$  K,对仪器进行两次标定。

将标准辐射源加热到参考温度并等辐射源温度稳定后,记录此时 4 个通道的电压值,为了减小误差,重复上述操作 5 次,并对 4 个通道电压值分别取平均,标定结果如表 3 所示。

表 3 不同参考温度时 4 个通道的电压值

Table 3 Voltage value of four channels at different reference temperatures

	1323 K	1373 K
0.78 $\mu\text{m}$	33 mV	37 mV
0.85 $\mu\text{m}$	38 mV	41 mV
0.98 $\mu\text{m}$	42 mV	47 mV
1.064 $\mu\text{m}$	46 mV	53 mV

实际测温时,将测得的 4 路电压值、参考温度值和对应的参考电压值作为已知量代入到(5)式中,求解方程组,就能得到被测温度。

### 4.2 测温实验

测温对象为马弗炉炉温,该炉升温速度快,并且配有观察窗和人机交互触摸面板。炉内的温度是利用热电偶测得并实时显示在人机交互触摸面板上,热电偶测温具有精度高和稳定性好等特点,因此可以将触摸面板上显示的温度作为真实温度来衡量测温仪的精度。

由于马弗炉的温控方式是比例-积分-微分(proportion-integral-differential, PID)自动控制,因此不能在加热过程中进行测温,否则测得结果会不稳定。解决办法是先将马弗炉加热到一定温度后,停止加热,等到温度降到设置的温度节点时,记录此时测量结果。

将测温仪的光纤探头固定在距离马弗炉观察窗 30 cm 处,启动马弗炉,设置 6 个测温节点,分别为 1423 K、1473 K、1523 K、1573 K、1623 K 和 1673 K,当炉内温度达到设定的温度节点后,开始测温。如图 10a 所示,在相同测量节点,不同参考温度下,测量结果和由热电偶测得的真实温度之间的绝对误差很小;观察图 10b 可知,在选取的参考温度  $T_1'$  和  $T_2'$  稳定的

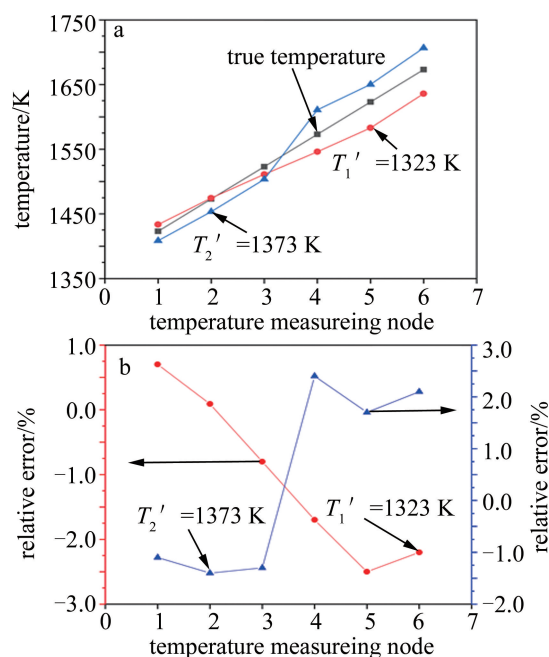


图 10 a—测量结果和真实温度的比较 b—测量结果的相对误差

Fig. 10 a—comparison of measurement results and true temperature b—relative error of measurement results

情况下,相对误差都在  $\pm 2.5\%$  之内。

## 5 结论

本文中介绍了一种便携式高速多光谱辐射测温仪的设计过程,利用光纤+带通滤光片的组合实现分光功能,降低了系统的复杂度,提高了仪器便携性;设计带宽为 5 MHz 的光电转换电路并利用高速 AD 转换芯片+FPGA 芯片+USB3.0 通信实现了数据的高速采集传输,仪器 AD 采样速率为 10 MHz,与上位机的通信速度为 100 MHz,足够响应微秒级变化的光辐射;利用 C#编程语言设计人机交互界面,具有温度显示和数据存储功能。对马弗炉炉温实际测量中,当参考温度选择为 1323 K 时,测温结果最大相对误差为  $-2.5\%$ ,最小为  $0.09\%$ ,参考温度为 1373 K 时,最大相对误差为  $2.4\%$ ,最小为  $1.1\%$ ,总体相对误差小于  $\pm 2.5\%$ 。

### 参考文献

- [1] QIN Y L, LI W, YANG Ch P, et al. Study of multispectral temperature measurement technique for laser damage[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(1):219-224 (in Chinese).  
秦亚楼,李伟,杨春平,等.激光毁伤中的多光谱测温技术研究[J].兵工学报,2019,40(1):219-224.
- [2] ZHAN Ch L, HAN J, LU Sh J, et al. Research on multi-spectral thermometry for the flame temperature measurement of ammunition explosions[J]. Metrology and Measurement Technology, 2018, 38(6):48-52 (in Chinese).  
占春连,韩军,路绍军,等.弹药爆炸火焰温度多光谱测温技术研究[J].计测技术,2018,38(6):48-52.

- [3] WANG Ch H, LIANG M, LIANG L, *et al.* A wide-range multi-spectral pyrometer for true temperature measurement of solid rocket engine plume[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(9):2860-2865(in Chinese).  
王昌辉, 梁美, 梁磊, 等. 用于固体火箭羽焰真温测量的宽量程多光谱高温计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(9):2860-2865.
- [4] SUN X X, GAO M, YU P J, *et al.* Overview of industrial contact temperature measurement technology [J]. *Electronics World*, 2021(23):23-24(in Chinese).  
孙晓曦, 高敏, 余鹏举, 等. 工业用接触式测温技术综述[J]. *电子世界*, 2021(23):23-24.
- [5] NORDINE P C, SHANKAR K, WEBER J K R, *et al.* Non-contact temperature measurement[J]. *Advances in Space Research*, 1991, 11(7): 17-31.
- [6] LI D. Research on radiation temperature measurement methods of gas turbine blade [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019: 48-52 (in Chinese).  
李东. 燃气轮机涡轮叶片辐射测温方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019:48-52.
- [7] ZHANG Z W. Research on multi-spectral radiation thermometry technology based on infrared spectrometer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020:17-21 (in Chinese).  
张子文. 基于红外光谱仪的多光谱辐射测温技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020:17-21.
- [8] SUN K. Research on technique of explosion flame true temperature measurement[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012:7-10(in Chinese).  
孙崐. 爆炸火焰真温测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012:7-10.
- [9] TAN K. Study on the effect of surface oxidation of continuous casting billet and water mist medium on radiation temperature measurement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019: 45-48(in Chinese).  
谭锴. 连铸坯表面氧化及水雾介质对辐射测温的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019:45-48.
- [10] WANG J Zh. Research on key technology in multi-spectral temperature measurement system based on prism[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015:75-78 (in Chinese).  
王巨震. 基于棱镜的多光谱测温系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015:75-78.
- [11] FENG Ch, MA D D, LI K. Application of IR conversion system on temperature measurement [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011(9):83-85(in Chinese).  
冯驰, 马东栋, 李康. 红外辐射光转换系统在温度测量中的应用[J]. *仪表技术与传感器*, 2011(9):83-85.
- [12] DENG X K, YANG Y J. Application and development of CCD multi-wavelength radiation thermometry[J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2011, 31(1): 45-49(in Chinese).  
邓兴凯, 杨永军. CCD 多光谱辐射测温技术的应用与发展[J]. *计量技术*, 2011, 31(1):45-49.
- [13] YANG Y L, LIU A X, MA C H, *et al.* Analysis of infrared temperature measurement model of molten steel based on infrared CCD[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(4):562-566(in Chinese).  
杨友良, 刘爱旭, 马翠红, 等. 基于红外 CCD 的钢水红外测温模型分析[J]. *激光技术*, 2018, 42(4):562-566.
- [14] TIAN Z L, NIU Ch H, CHEN Q Sh. Development of high-speed multi-spectral radiation temperature measurement system [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(6):773-778 (in Chinese).  
田泽礼, 牛春晖, 陈青山. 高速多光谱辐射测温系统研制[J]. *激光技术*, 2022, 46(6):773-778.
- [15] PAN W D. Research on nozzle plume temperature distribution measurement system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008:32-38(in Chinese).  
潘卫东. 喷管羽流温度场测量系统的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008:32-38.
- [16] SUN X G, DAI J M, LU X D. The theory of multi-wavelength thermometry and its fitting error estimation[J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 1997, 13(4):42-45(in Chinese).  
孙晓刚, 戴景民, 卢小冬. 多波长辐射测温理论及其拟合误差的估计[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 1997, 13(4):42-45.
- [17] CHEN J X, LIU G. Analysis of electromagnetic shielding with a incompletely sealed metal plane[J]. *Electronic Test*, 2008(7):28-30 (in Chinese).  
陈建行, 刘刚. 非完全密封金属板电磁屏蔽方法分析[J]. *电子测试*, 2008(7):28-30.
- [18] ZHAO M, LI X, HAN B, *et al.* Overview on design of the high-speed transimpedance amplifier [J]. *Journal of Electron Devices*, 2009, 32(3): 570-573(in Chinese).  
赵萌, 李雪, 韩波, 等. 高速跨阻放大器设计综述[J]. *电子器件*, 2009, 32(3):570-573.
- [19] GLEN B. Operational amplifier LTC6268 gives new light to optoelectronic applications [J]. *China Electronic Market (Basic Electronics)*, 2017(9):21-26(in Chinese).  
GLEN B. 运算放大器 LTC6268 赋予光电子应用新的光芒[J]. *中国电子商情(基础电子)*, 2017(9):21-26.
- [20] XIA D F. Measurement technique research and realization of high speed ADC—a case study of AD9238[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015:27-35(in Chinese).  
夏达方. 高速 ADC 测试技术的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015:27-35.