

基于FPGA的红外热成像温度检测算法研究

梁凯^{1,2} 易映萍^{1,2} 唐春晖^{1,2} 魏卓^{1,2}

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2. 许继集团有限公司 许昌 461000)

摘要: 以非制冷式红外焦平面技术为基础的非制冷式热成像仪以其价格低、体积小的优势,在非接触式测温领域得到广泛的应用。目前市面上的热成像仪对温差的识别非常敏感,但是无法通过从热成像仪获得的电信号数据得知目标的具体温度。而能够进行非接触式测温的成品热成像仪不仅价格高昂,而且保密的封装使得二次开发的难度较大。基于以上问题,本文搭建基于FPGA和MATLAB的热成像系统,得到了一种温度检测算法的获取方法。通过该实验方法来取得由电信号转换为具体温度的算法及其关键系数。实验结果表明,该温度算法的误差较小,在温度测量预警系统有较强的工程意义。

关键词: 红外热像仪;FPGA;MATLAB;温度检测

中图分类号: TN211 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1060

Research on infrared thermal imaging temperature detection algorithm based on FPGA

Liang Kai^{1,2} Yi Yingping^{1,2} Tang Chunhui^{1,2} Wei Zhuo^{1,2}(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. XUJI Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The thermal imager based on uncooled infrared focal plane technology is widely used in the field of non-contact temperature measurement with its low price and small size. The current thermal imagers can detect different temperature but it is hard to obtain the specific temperature of the targets. Besides, the thermal imager which has completely packaged is expensive and hard to re-develop. Based on these problems, a thermal imaging system was built based on FPGA and MATLAB, a method to obtain the temperature detection algorithm was provided in this paper. This method can obtain the electrical signal to specific temperature algorithm and its key coefficient. The experimental results show the error of the temperature algorithm is so small that it has a strong engineering significance for temperature detection warning systems.

Keywords: infrared thermal imager; FPGA; MATLAB; temperature measurement

0 引言

温度检测的方法包括接触式测温和非接触式测温。在目前的温度预警系统中,大多数采用的是接触式测温法^[1-3]。其动态响应通常较慢,并且难以做到同时对多点测温预警^[4]。而目前使用非接触式测温技术,如红外热成像技术的温度预警机理是监测目标区域的某一点在上位机中的灰度值,如果该点的灰度值或灰度变化率大于一定阈值则报警^[5-6]。但是存在一种情况,如果监测的目标区域中所有的点整体升高一个温度等级,那么上述中利用红外热成像仪的灰度值大小和灰度值变化率来测温 and 预警的预警系统就会失去作用。因为红外热成像的灰度值是和监测区域

中的温度最小值有关,如果最小值的大小变化,预警就会误判或者延迟。

基于以上这种情况,本文提出了使用热成像探头的输出电信号数据作为测温 and 预警的依据,并搭建了基于FPGA和MATLAB的红外热成像系统,经过实验得出了计算红外热成像中某点温度的算法表达式。

1 热成像测温原理

红外波段在大气中透射率最高的有3个波段,为1~2.5 μm 、3~5 μm 、8~14 μm ^[7]。通常民用的温度预警系统的温度监测值大约在300~400 K。由于红外辐射的特点是温度低的辐射波长长,因此本文选用了工作在8~14 μm

波段的 FLIR 公司的 lepton 热成像仪,可以使目标温度的检测更加精准。

工作在窄波段(8~14 μm)、近距离(大气透射率近似为 1)、满足灰体近似的红外热成像的测温原理表现为^[8]

$$V_s = A_0 A_R d^{-2} (\epsilon f(T_0) + (1 - \epsilon)f(T_u)) \quad (1)$$

其中, V_s 是 lepton 采集到的电信号; A_0 是最小空间张角所对应的目标的可视面积; A_R 是 lepton 的透镜面积; d 是目标物体与 lepton 之间的距离; ϵ 是目标物体的发射率; T_0 是目标物体的真实温度; T_u 是当前的环境温度; $f(t) = 1.9675 \times 10^{-8} \times T^{3.9889}$ 。

由于

$$A_0 = 4 d^2 \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \quad (2)$$

$\theta_1 = 50^\circ, \theta_2 = 39^\circ$ 分别为 lepton 的镜头的长宽张角, $A_R = 0.9057 \text{ mm}^2$, 因此

$$A_0 A_R d^{-2} = 5.98 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \quad (3)$$

若目标对象为不透明度大于 50% 非金属物体, 则 ϵ 可以取 0.9~0.95^[9]。但如果目标对象为氧化铁等金属物体, 则 $\epsilon = 0.6$ 。设环境温度 $T_u = 298$, 对于 273~335 K 的金属目标($\epsilon = 0.6$)和非金属目标($\epsilon = 0.95$)以及黑体($\epsilon = 1$), 它们在热成像中的电信号大小如图 1 曲线所示。其中在目标温度为 335 K 时, 标准黑体的温度与金属、非金属物体的温度差分别为 9.0% 和 1.1%。

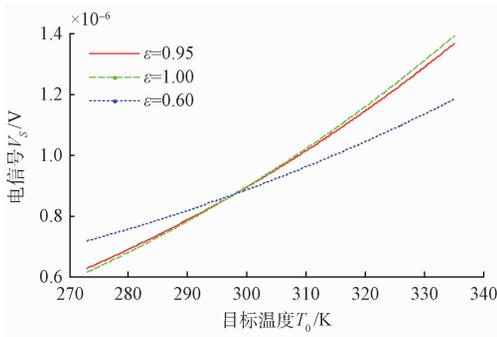


图 1 不同发射率的温度对电信号曲线对比

因此在本文实验中, 选择非金属材质表面的物体为红外靶标, 并近似认其为标准黑体而忽略环境温度的影响。式(1)结合式(2)、(3)可以得到:

$$V_s = 5.98 \times 10^{-9} \times 1.9675 \times 10^{-8} \times T_0^{3.9889} \quad (4)$$

由此可知, lepton 热像仪所采集到的电信号 V_s 和 $T_0^{3.9889}$ 成正比例关系。而电信号 V_s 与 FPGA 在 lepton 接收到的像素数据成线性关系。也就是说, 设接收到的某点像素的数据值大小为 y , 则该点的电信号值

$$V_s = a * y + b \quad (5)$$

其中 a, b 为待定系数。

将式(5)代入式(4)得:

$$a * y + b = 5.98 \times 10^{-9} \times 1.9675 \times 10^{-8} \times T_0^{3.9889} \quad (6)$$

亦即:

$$y = (k T_0^{3.9889} - b) / a \quad (7)$$

2 基于 FPGA 热成像的数据获取

FPGA 拥有强大的并行处理能力和丰富的逻辑电路资源, 在图像信息的处理中有先天的优势^[10]。本文采用的 FPGA 芯片型号为 EP4CE6F17C8, 晶振频率 50 MHz。

使用 Quartus II 软件编写基于 Verilog 语言的 lepton 控制程序包含锁相环模块、IIC 模块、SPI 模块、写函数模块、发送模块和 SDRAM 模块。顶层模块原理图如图 2 所示:

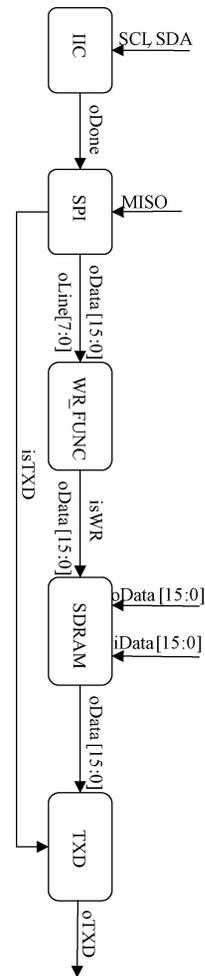


图 2 基于 FPGA 的 lepton 控制程序模块

其程序流程图如图 3 所示。

该代码功能是操作 FPGA 读取 lepton 的图片数据并发送到上位机。Lepton 的相机状态读取遵循 IIC 传输协议, 图片数据的传输遵循 SPI 传输协议。读取的数据发送到 SDRAM 中缓存, 判断数据的正确性后以 10 M 波特率、8 位数据位、1 位停止位、无校验位格式传到上位机。这里的数据判断使用了双重判断机制, 即判断图片每行数据的

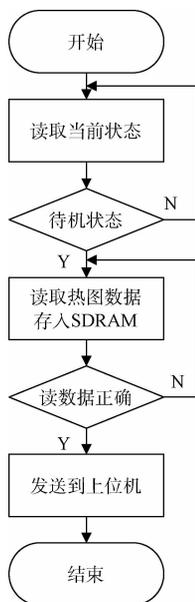


图 3 基于 FPGA 的 lepton 控制程序流程

行号和判断总行号同时进行。实验表明,使用双重判断机制要比不使用时图片数据正确接收率提高 15~20%。

3 基于 MATLAB 的红外灰度图像处理

MATLAB 支持包括灰度图像在内的多种图像类型的直接显示和操作。本文使用 MATLAB 搭建了上位机检测程序,该程序的功能是接收下位机发送的数据并进行灰度和伪彩色图片的生成、完成关键测温区域的数据记录保存以及生成拟合结果。MATLAB 程序基本流程图如图 4 所示。

由于 lepton 动态扫描范围比较大,因此需要把从 lepton 采集到的图像数据灰度量化^[11],即将温度的变化范围转换成 n 阶(不一定是 256)的灰度范围。在显示为图像前通常需要对采集到的 lepton 数据值进行拉伸或压缩。在本文所编写的 MATLAB 程序中采取的处理方法是寻找整幅图的最大值和最小值,以最小值为基准,最大值和最小值的差值为灰度量化阶数 n 。即假设从 lepton 接收到的某点像素的数据值大小为 y ,处理后的灰度值为 y_1 ,热成像图片中的最值差为 d ,则有:

$$y_1 = y - d \quad (8)$$

对原始数据处理完成后即可以位图(PGM)的格式显示和储存。PGM 文件分为两种格式,即 P2 格式和 P5 格式。P2 格式的文件,每个像素使用字符串来表示,像素数据之间需要一个空格符分开存储,在图像的每一行数据结束时需要换行。而 P5 格式是以字节为单位储存的,每个像素数据之间没有间隔,图像一行信息结束后从下一行第一列继续,直到将图像的所有信息表示完。本文为了便于 MATLAB 的解码读取而采用 P2 格式。

灰度和伪彩色的图像处理是为了实时观测 lepton 热成

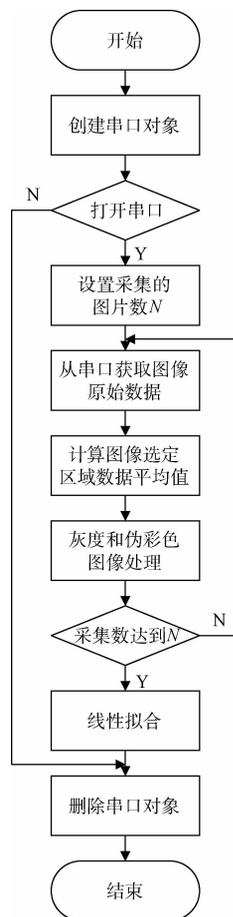


图 4 基于 MATLAB 的图像数据处理程序流程

像仪的工作状态。其中灰度图采用了双线性插值^[12]处理,灰度转伪彩色使用了彩虹调色板^[13]。处理前后的对比图如图 5(a)~(d)所示。双线性插值处理弱化了原始图中的锯齿,而伪彩色处理凸显了原始图中的细节。总的成像效果有了明显的提升。

4 实验研究

lepton 采集接收到的靶标某点温度对应的数据值大小可以由式(9)表示

$$y = (k T_0^{3.9889} - b)/a \quad (9)$$

因此只要求得参数 a 、 b 、 k 的值,就可以由该点像素数据值的大小计算出该点对应靶标的实际温度值。

本文采用实验的方法^[14],测量了目标物体(表面为非金属材料,发射率接近 1)在 298.15~325.55 K(26~53.4 °C)的 y 值,并与实际温度进行一一比对和拟合而得到所需要的参数值。

查阅产品手册得知 lepton 的有效拍摄距离在 100 mm 到正无穷,因此首先将 lepton 热成像仪固定在距离被测物体 130 mm 处,以尽量降低大气的消光作用^[15]对实验结果的影响。然后对红外靶标拍照,取得一幅 60×80 像素的热

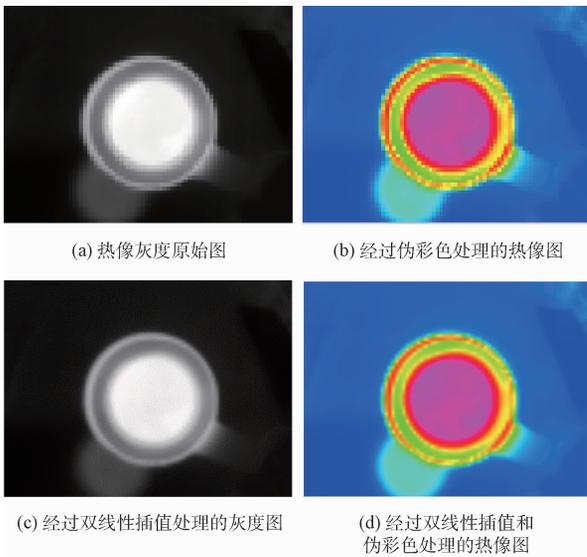


图 5 经过伪彩色和双线性插值处理的前后对比

成像原始图(未经灰度量化)。在采集到的原始像素数据中 10×10 的像素数据取其平均值 \bar{y} , 对应实际约 $121 \text{ mm} \times 92 \text{ mm}$ 的一个区域的平均温度 \bar{T}_0 。此时测出这个区域的温度后, 即可建立像素数据 \bar{y} 与平均温度 \bar{T}_0 之间的离散对应关系。最后用 MATLAB 拟合曲线即可得到所要求的参数 a, b, k 的值。实验装置结构示意图如图 6 所示。

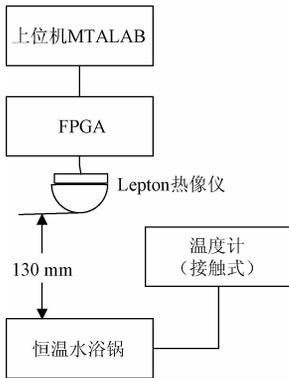


图 6 实验装置结构示意图

经过上述实验之后得到:

$$a = 0.00335 \tag{10}$$

$$b = -21.14 \tag{11}$$

$$k = 7.883 \times 10^{-10} \tag{12}$$

亦即实际温度 T_0 可由式(13)求得

$$T_0 = \sqrt[3.9889]{\frac{6.452 \times 10^{-4} y - 4.027}{1.574 \times 10^{-10}}} \tag{13}$$

其中 y 为从 lepton 采集到的数据值。

实验结果的拟合曲线如图 7 所示, 实际温度与拟合曲线的温度误差平均值为 0.59°C , 该精度已满足绝大多数的工程测温预警要求。

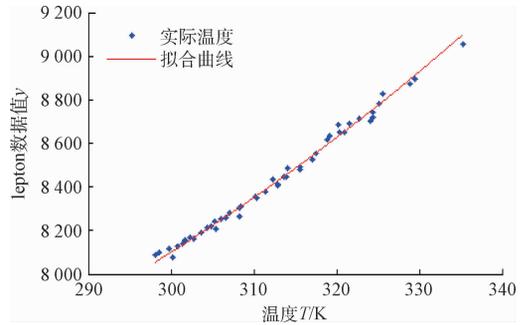


图 7 实验数据和拟合曲线

5 结 论

本文分析了目前热成像灰度图测温方法存在的缺陷和不足, 设计了基于 FPGA 和 MATLAB 的热成像温度检测系统, 对系统的组织架构和基本原理进行了说明, 对热成像原图做了进一步的优化并设计了热成像温度检测实验, 最终得到了热成像原始数据对靶标实际温度的转换算法。该转换算法的精度可满足目前工程的实际需要, 有较强的工程意义和广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 陈电星, 戴红梅, 王丽丽, 等. 煤矿主井绞车房温度监测系统的设计[J]. 煤矿机械, 2010, 31(8):63-66.
- [2] 徐晓兵. 珠海电厂 220 kV 电缆在线温度预警系统[J]. 电力信息与通信技术, 2009, 7(5):69-70.
- [3] 叶永伟, 杨超, 王永兴, 等. 自适应环境温度变化的压力式温度仪表的研制[J]. 仪器仪表学报, 2016, 17(5):1087-1093.
- [4] 李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [5] 陈学军, 杨永明. 一种基于双波段红外视频火灾探测器的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3):473-479.
- [6] 童秋德. 基于红外成像的煤矿火灾预警系统的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- [7] 胡测. 基于 FPGA 的便携式红外与可见光图像融合系统研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
- [8] 丁维一. 非制冷红外热成像测温系统关键技术和算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
- [9] 崔雨, 李鸿飞. 红外测温仪的原理与实际应用指南[J]. 自动化与仪器仪表, 2009(6):103-104.
- [10] 何雯, 董威, 苟辉. 基于 FPGA 的高速视频采集系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5):83-87.
- [11] 方甲永, 童中翔, 谢娟. 一种新的飞机红外图像灰度量化方法[J]. 激光与红外, 2016, 46(4):425-429.
- [12] 龚昌来, 罗聪, 杨冬涛. 一种基于边缘方向的双线性插值方法[J]. 激光与红外, 2010, 40(7):788-791.

- [13] 付冬梅,文伟. 红外图像伪彩色编码方法与实现[C]. 先进光学技术及其应用研讨会, 2009.
- [14] 巩稼民,王贝贝,郭涛,等. 用于分析灰度与温度相关性的红外探测设备[J]. 红外技术, 2016, 38(2): 168-174.
- [15] 高文静,王亚莉,殷智勇,等. 大气透过率对红外系统作用距离的影响分析[J]. 激光与红外, 2016, 46(7):832-837.

作者简介

梁凯,硕士研究生,主要研究方向为红外测温技术、

图像处理、FPGA等。

E-mail:316279857@163.com

易映萍,工学硕士,副教授,研究方向为电力电子与电力传动,电机与电器,电力系统与自动化。

E-mail:yyp@usst.edu.cn

唐春晖,博士,讲师,研究方向为计算机视觉与模式识别。

E-mail:chunhuitang@163.com

魏卓,工程师,研究方向为直流输电控制技术。

E-mail:18637475201@163.com