

3.2 ~ 3.4 μm 红外热像仪基于拟合的测温方法

李冠霖, 范永杰, 王正吉, 刘宇宇
(昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 研究目的为 3.2 ~ 3.4 μm 窄波段红外热像仪的测温方法, 本文从图像处理领域出发, 利用红外热像仪和标准辐射源黑体, 在一定的环境温度下, 采集不同温度的黑体红外图像, 通过数学建模软件对黑体图像进行灰度值计算, 进而探究图像灰度值与温度的相关性, 并基于最小二乘法和插值拟合思想构造黑体标定曲线, 根据得到的标定曲线和已有的灰度值推出验证温度。经验证结果表明, 测温精度有所提升, 误差在 0.49 $^{\circ}\text{C}$ 以内。

关键词: 窄波段; 红外热像仪; 黑体; 灰度值; 测温

中图分类号: TN219; O434 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.01.013

Fitting-based temperature measurement for 3.2 ~ 3.4 μm infrared thermal imager

LI Guan-lin, FAN Yong-jie, WANG Zheng-ji, LIU Yu-yu

(School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The purpose of this paper is to study the temperature measurement method of narrow band infrared camera. Firstly, starting from the field of image processing, an infrared thermal imager and a standard radiation source blackbody is used to collect blackbody infrared images at different temperatures at a certain ambient temperature. Then, the gray value of the blackbody image is calculated through mathematical modeling software and the correlation between the gray value and temperature is explored. Finally, the blackbody calibration curve is constructed based on the least squares method and interpolation fitting idea and the verification temperature is derived from the resulting calibration curve and the existing gray value. The validation results show that the temperature measurement accuracy has been improved, and the error is within 0.49 $^{\circ}\text{C}$.

Keywords: narrow band; thermal imaging cameras; Blackbody; grayscale value; temperature measurement

1 引言

3.2 ~ 3.4 μm 制冷型中波红外热像仪利用红外探测器过滤波长, 以及斯特林冷却器过滤技术, 可视化甲烷、六氟化硫、二氧化碳等气体和制冷剂的红外吸收, 能够检测天然气生产和使用过程中排放的碳氢化合物和挥发性有机化合物, 检测速度比传统工具的

检测速度快, 而且不需要近距离接触部件, 灵敏度高, 即使低浓度气体也能检测到^[1]。虽然 3.2 ~ 3.4 μm 制冷型中波红外热像仪成像技术成熟, 但是关于测温技术研究较少, 近年来人们以动物脏器、火焰等为对象研究了图像灰度与温度的相关性, 取得了较好的成果, 但具有一定的局限性^[2-4]。本文将在有关资料和

作者简介: 李冠霖 (1998 -), 女, 硕士研究生, 主要从事红外热成像测温技术的研究。-mail: 973398169@qq.com

通讯作者: 范永杰 (1980 -), 男, 博士, 讲师, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理以及光电检测技术的研究。E-mail: fanyj1980@263.net

收稿日期: 2023-04-10; 修订日期: 2023-05-31

自己研究的基础上,利用 3.2 ~ 3.4 μm 制冷型中波红外热像仪,对红外图像和温度进行分析,基于最小二乘法和插值拟合思想构造函数,找到了窄波段红外热像仪的测温方法。

2 制冷型红外热像仪测温原理

一切有温度并且温度高于绝对零度的物体都会向外辐射能量,这些能量是以各种波长存在的电磁波,其中红外辐射光波具有很强的温度效应,红外热像仪是靠接收来自被测物体表面辐射能量来测量温度。面源黑体作为红外谱段的标准辐射源,向外辐射能量,不同温度的黑体发出的辐射都有一定的光谱分布特征,普朗克定律描述了黑体辐射的光谱分布规律,是黑体辐射理论的基础,基于普朗克辐射定律,就有相应的光谱辐射量:

$$M_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1} \quad (1)$$

斯蒂芬-玻尔兹曼定律表明黑体在单位面积上单位时间内辐射的总能量与黑体温度 T 的四次方成正比:

$$M_0(T) = \int_0^\infty M_0(\lambda, T) D\lambda C = \frac{c_1 \pi^4}{15c_2^4} T^4 = \sigma T^4 \quad (2)$$

不同温度的黑体辐射出的能量不同,红外光学镜头将辐射量聚集到中波制冷探测器上,量子效率是探测器的重要指标,是指探测器可以转换成电子与入射光子的百分比,电容储存自由移动的电荷,然后输出电压信号。不同温度的黑体辐射的能量不同,探测器输出的电压信号也不同,最后通过 AD 模电转换器将电压信号转换成灰度值输出^[5-6],具体过程如图 1 所示。

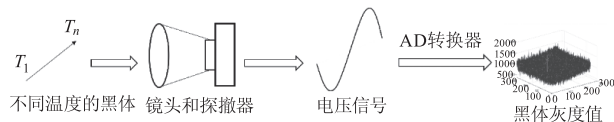


图 1 制冷型红外热像仪测温原理

Fig. 1 Temperature measurement principle of refrigerated thermal imaging camera

3 实验方法与步骤

3.1 实验方法

首先把红外设备放在黑体面源正前方,通过改变黑体的温度(每间隔 5 °C 采集一组黑体图像)采集得到 5 ~ 45 °C 的图片,共采集 9 组黑体红外图像,

每组 200 张,以便接下来用 matlab 研究图片灰度值与黑体温度的关系。

3.2 实验步骤

面源黑体作为红外谱段的标准辐射源,可在本实验应用于红外热像仪的测温标定。将采集到的数据分为两组,一组为测试数据,另一组为验证数据。黑体温度为 5 °C、15 °C、25 °C、35 °C、45 °C 的红外图片作为测试数据,利用 Matlab 软件对红外图片进行灰度值的提取,根据普朗克辐射定律和斯蒂芬-玻尔兹曼定律推导出黑体灰度值与温度的关系,拟合出理想的黑体标定曲线。将黑体温度为 10 °C、20 °C、30 °C、40 °C 的图片作为验证数据,同样利用 Matlab 软件对灰度图像进行灰度值的提取,把灰度值映射到标定曲线中,反向推导出验证温度,能够达到理想的测温精度。

4 基于最小二乘法和插值拟合思想的测温方法

像素是组成图像的最基本单元,也就是说每个灰度图片都是由不同灰度值的像素点组成^[7],因此为了分析图像灰度值与温度的关系,我们可以把一定温度下采集到的黑体红外图片,用 Matlab 程序取其灰度平均值。以环境温度 25 °C 为例,获取黑体温度在 5 °C、15 °C、25 °C、35 °C、45 °C 的 5 个温度值 T₀ 以及得到的热像仪输出灰度值 V 作为测温定标曲线的基础数据,处理后的各组图像灰度均值如表 1 所示。

表 1 环境温度为 25 °C 时,不同黑体温度下对应的图像平均灰度值

Tab. 1 When the ambient temperature is 25 °C, the average gray value of the image at different blackbody temperatures

黑体温度 T ₀ /K	278. 15	288. 15	298. 15	308. 15	318. 15
灰度值/V	1890	3189	5090	8127	12990

最小二乘法,所谓“二乘”就是平方的意思,台湾直接翻译为最小平方法,用平方来代表误差,寻找数据的最佳函数匹配。插值拟合是根据已知的数据序列,找到其中的规律,然后根据找到的这个规律,来对其中尚未有数据记录的点进行数值估计,可以对数据中的缺失进行合理补偿^[8-10]。

实验数据是黑体温度在 5 °C、15 °C、25 °C、35 °C、45 °C 的 5 个温度值,以图像灰度信息作为对象,通过不同的拟合方法,对图像灰度值进行细分,

即可快速得到黑体对应的温度。以实验数据的灰度值为例进行三次方多项式曲线拟合如图 2(a)和三次样条插值如图 2(b)。运行程序后,发现虽然两种方法的误差较小,但是三次方多项式曲线拟合和三次样条插值在 45 °C 的数据点都出现了扭摆的现象,不收敛到被拟合曲线。

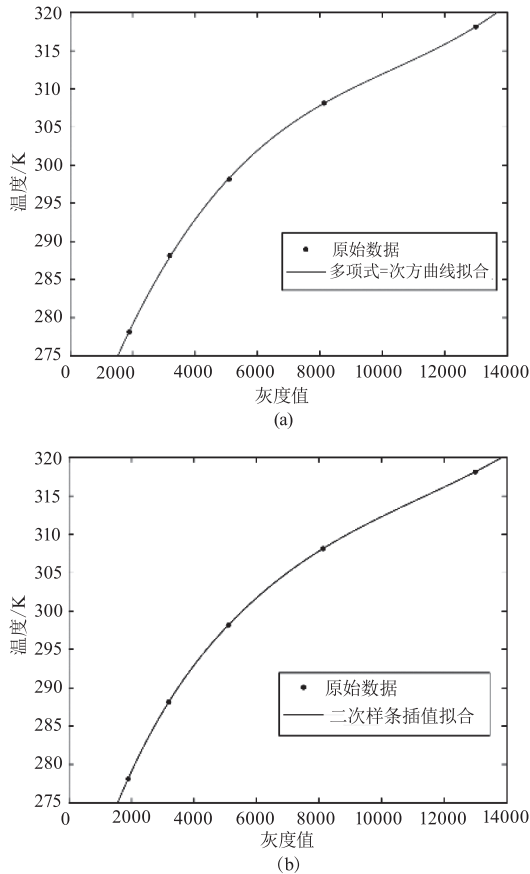


图 2 多项式三次方曲线拟合和三次样条插值拟合

Fig. 2 Polynomial cubic curve fitting and cubic spline interpolation fitting

通过普朗克辐射定律和斯蒂芬-玻尔兹曼定律的分析,一个黑体表面单位面积在单位时间内辐射出的总功率与黑体本身的热力学温度的四次方成正比:

$$M_0(T) = \int_0^{\infty} M_0(\lambda, T) D\lambda C = \frac{c_1 \pi^4}{15 c_2^4} T^4 = \sigma T^4 \quad (3)$$

当温度作为因变量时,公式可变化为:

$$T_0(M) = \sqrt[4]{\frac{M}{\sigma}} \quad (4)$$

黑体设定的温度与热像仪输出的灰度值是两个设备的数据,并非直接相关。如果直接寻找热像仪灰度值 V 与黑体设定温度 T_0 的对应关系

T_0 - V 曲线,会存在较大的误差。基于多项式曲线拟合和三次样条插值思想,构造下面的黑体标定函数:

$$y = A + B \cdot x + C \cdot x^{\frac{1}{2}} + D \cdot x^{\frac{1}{3}} + E \cdot x^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

用 matlab 建模,发现曲线光滑如图 3(a)所示,残差达到理想效果如图 3(b)所示。

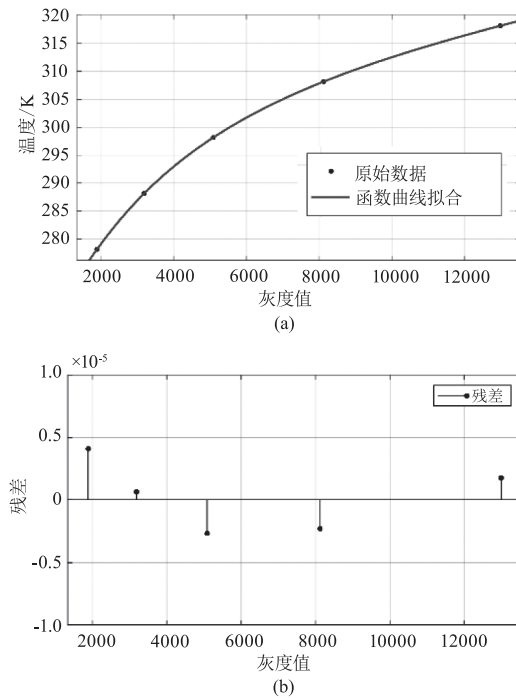


图 3 黑体标定曲线

Fig. 3 Blackbody calibration curve

5 实验验证

5.1 黑体实验验证

将黑体温度为 10 °C、20 °C、30 °C、40 °C 的图片作为验证数据,利用 Matlab 软件对灰度图像进行灰度值的提取,将得到的灰度值作为变量映射到黑体标定曲线中,得到的验证温度如表 2,分析表中数据可以得到,验证温度误差在 0.05 ~ 0.49 °C 之间。

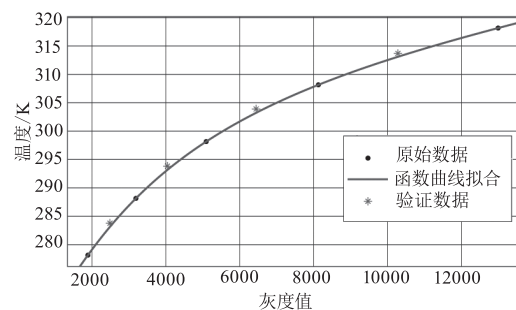


图 4 黑体实验验证温度

Fig. 4 Blackbody experiment to verify temperature

表 2 黑体温度的验证

Tab.2 Verification of blackbody temperature

采样灰度值	实验温度/ °C	验证温度/ °C	误差/ °C
2487	10	10.1261	0.1261
4042	20	20.0502	0.0502
6443	30	29.9376	0.0624
10280	40	39.5154	0.4846

5.2 实际场景实验验证

将红外设备采集到的实际场景红外图像(如图5)读入 matlab 中,提取人脸、电脑、墙壁、黑体坐标点对应的辐射数据,将辐射数据带入拟合好的黑体标定曲线中,将红外图片三维显示,利用 matlab 软件结合黑体标定拟合曲线进行程序编写,便可以通过游标数据,得到每个位置的灰度值以及对应的温度(如图6),计算出如表3的结果。在此场景中,作为标准源的黑体设置的温度为 24 °C,验证温度为 24.24 °C,误差为 0.24 °C。

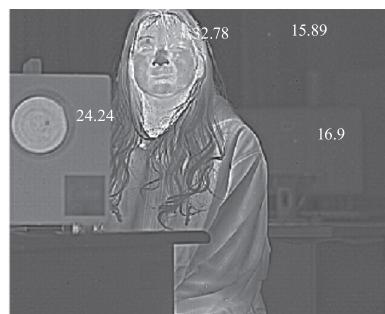


图 5 实际场景红外图像

Fig.5 Infrared image of the actual scene

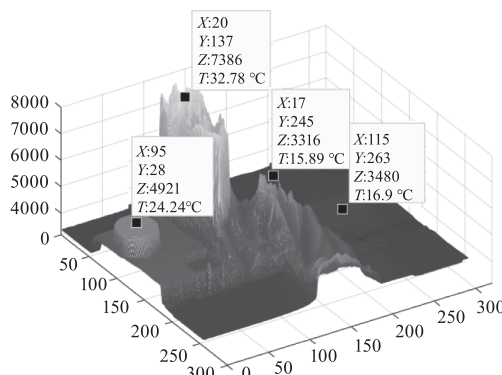


图 6 精准定位测温

Fig.6 Precise positioning and temperature measurement

表 3 实际场景实验验证

Tab.3 Experimental verification in actual scenarios

	辐射数据	插值拟合法验证温度/ °C	黑体标定曲线验证温度/ °C	物体的发射率
黑体	5089	24.27	24.24	0.96 ~ 0.99
电脑外壳	3487	16.83	16.9	0.95 ~ 0.97
人体皮肤	7111	33.02	32.78	0.98 ~ 0.99
墙壁	3344	15.82	15.89	0.90 ~ 0.95

6 结论

本文在基于红外热成像温度场测量技术,通过黑体辐射源的红外图像灰度值和温度数据分析,得到了拟合曲线,能够计算出目标温度。天然气这种无色无味易燃易爆的气体,人眼不易察觉,当它泄漏到空气中时,一旦遇到明火就会发生爆炸,因此要定期进行天然气泄露检查工作,防患于未然。在电力设备检查、造纸草料自燃等易发生火灾的情况下,利用红外探测设备通过红外图片分析它的温度场分布,当检测到温度达到温度预警时,可以及时采取有效手段对场景进行防护,避免火灾发生。

目前的工作只考虑理想状况,对于一些发射率高的物体^[11-12]可以拟合得到比较精确的温度,如人

体皮肤、电脑外壳、墙壁、火焰,对于发射率低但反射率高,与黑体发射率差异较大的物体是后续的研究,不在本文讨论范围。

参考文献:

[1] Gong Jiamin, Wang Beibei, Guo Tao, et al. Infrared detection equipment for analyzing the correlation between grayscale and temperature[J]. Infrared Technology, 2016, 38(2):168-174. (in Chinese)
 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.

[2] Wang Huawei. Research on key technology of temperature field measurement based on infrared thermography[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, 2013. (in Chinese)

- 王华伟. 基于红外热成像的温度场测量关键技术研究[D]. 西安:西安光学精密机械研究所, 2013.
- [3] Lan Menghua. Research on infrared temperature measurement and image processing algorithm based on DM642[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- 兰孟华. 基于 DM642 的红外测温与图像处理算法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
- [4] RenXinxin, WuShuicai, DuXu, et al. Correlation between grayscale and temperature oftissue B-type ultrasound image[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2004, (2): 116 - 118. (in Chinese)
- 任新颖, 吴水才, 杜旭, 等. 组织 B 型超声图像灰度与其温度相关性研究[J]. 北京生物医学工程, 2004, (2): 116 - 118.
- [5] Kong Chen, Sun Jian. Application of linear grayscale transformation algorithm in infrared temperature measurement system[J]. Infrared Technology, 2008, (8): 465 - 467, 484. (in Chinese)
- 孔琛, 孙坚. 线性灰度变换算法在红外测温系统中应用[J]. 红外技术, 2008, (8): 465 - 467, 484.
- [6] Mao Wei. Design of infrared temperature measurement algorithm and signal processing system based on ARM[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- 毛伟. 基于 ARM 的红外测温算法及信号处理系统设计[D]. 南京:南京理工大学, 2014.
- [7] Li Shuhang, Gao Xu, Liu Zhaowu, et al. Stripe image displacement subpixel detection algorithm based on grayscale interpolation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 9. (in Chinese)
- 李舒航, 高旭, 刘兆武, 等. 基于灰度插值的条纹图像位移亚像素检测算法[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 9.
- [8] Dai S S, Yan X H, Zhang T Q. Study on high-precision temperature measurement of infrared imager[J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53(5): 396 - 398.
- [9] Zhang Zhiqiang, Wang Ping, Yu Xudong, et al. Research on high-precision infrared thermal imaging temperature measurement technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, (5): 9. (in Chinese)
- 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, (5): 9.
- [10] Guan Shanghong, Yang Haibo, Shao Ming, et al. Research on temperature calibration method for infrared imaging based on curve fitting[J]. Optoelectronic Technology Application, 2018, 33(5): 6. (in Chinese)
- 官上洪, 杨海波, 邵铭, 等. 基于曲线拟合的红外成像测温定标方法研究[J]. 光电技术应用, 2018, 33(5): 6.
- [11] Elmalem S, Marom E. All-optical athermalization of infrared imaging systems using thermally dependent binary phase masks[J]. Journal of Optics, 2016, 18(6): 065604.
- [12] Moropoulou A, Avdelidis N P. Emissivity measurements on historic building materials using dual-wavelength infrared thermography[J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2001, 4360: 224 - 228.