

红外热像仪高精度测温标定技术

蔡李靖 周凯来 沈桂竹 姚一杨 邱兰馨 字崇德 曹汛

High-precision temperature measurement and calibration technology of infrared thermal imager

Cai Lijing, Zhou Kailai, Shen Guizhu, Yao Yiyang, Qiu Lanxin, Zi Chongde, Cao Xun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210043>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热传递对异面腔四频差动激光陀螺温度漂移补偿的影响

Influence of thermal transfer on temperature drift compensation in nonplanar four-frequency differential laser gyros

红外与激光工程. 2019, 48(9): 905005–0905005(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0905005>

非均匀温度场下红外热成像仪温控系统设计

Design of temperature control system for infrared thermal imager under non-uniform temperature field

红外与激光工程. 2019, 48(6): 604002–0604002(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0604002>

基于红外技术的液体火箭发动机尾焰流场测量研究

Study of liquid rocket engine plume flow field measurement based on the technology of infrared

红外与激光工程. 2017, 46(2): 204003–0204003(5) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0204003>

光纤法珀压力传感系统设计与风洞初步实验

Design and preliminary experiment of optical fiber F-P pressure sensing system working in wind tunnel

红外与激光工程. 2018, 47(7): 722002–0722002(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0722002>

热像仪对QFN封装表面发射率环境透射率的标定

Surface emissivity and the environment transmittance calibration for QFN package with thermal imager

红外与激光工程. 2017, 46(9): 917004–0917004(5) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0917004>

机载热红外高光谱成像仪的光谱性能测试与初步应用

Laboratory calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS)

红外与激光工程. 2020, 49(5): 20190117–20190117–7 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190117>

红外热像仪高精度测温标定技术

蔡李靖¹, 周凯来¹, 沈桂竹², 姚一杨², 邱兰馨², 宇崇德¹, 曹 汛¹

(1. 南京大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210123;
2. 国网浙江省电力有限公司信息通信分公司, 浙江 杭州 310020)

摘要: 红外热像仪能够监测目标温度从而起到事故预警与位置确认、大规模人体表面温度筛查等作用。由于环境温度变化与红外辐射吸收产生的温度漂移现象, 目前大部分测温红外热像仪需要采用黑体进行实时校正, 但是基于黑体的红外热像仪架设场景固定, 便携性差。针对以上问题提出了一种无黑体式红外热像仪测温标定和温度补偿技术, 通过对红外测温原理进行推导, 采用多黑体标定获得目标温度与辐射量的先验关系, 针对探测器内部结构引起温度漂移, 由牛顿冷却定律进行非线性建模实现实时温度补偿。通过实验验证, 所提出的测温标定技术可将测温平均相对误差长时稳定保持在 0.9% 以内, 相比于标定前平均相对误差有效降低 64%, 从而实现小型化红外热像仪便携、实时、稳定高精度测温。

关键词: 红外热像仪; 测温标定; 温度补偿; 长时稳定

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210043

High-precision temperature measurement and calibration technology of infrared thermal imager

Cai Lijing¹, Zhou Kailai¹, Shen Guizhu², Yao Yiyang², Qiu Lanxin², Zi Chongde¹, Cao Xun¹

(1. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210123, China;
2. Information & Telecommunication Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Co., LTD., Hangzhou 310020, China)

Abstract: The infrared thermal imager can monitor the target temperature, which plays the role of accident warning and location confirmation, large-scale human temperature screening and so on. Due to the temperature drift caused by the change of ambient temperature and infrared radiation absorption, most of the infrared thermal imagers for temperature measurement need blackbody for real-time calibration, but the blackbody-based infrared thermal imagers are limited by the fixed scene and poor portability. To solve this problem, a temperature calibration and compensation method without blackbody was proposed. By deducing the principle of infrared temperature measurement, the prior relation between target temperature and radiation quantity was obtained with multiple blackbodies calibration, and for addressing temperature drift caused by the internal structure of the detector, the temperature compensation was realized by non-linear modeling based on Newton's cooling law. The experimental results show that the proposed methods have the long-term stability to keep the relative error of temperature measurement within 0.9%, reduce the average relative error by 64%, and realize the portable, real-

收稿日期: 2020-12-31; 修订日期: 2021-04-19

基金项目: 国家电网公司科技项目 (5700-202019186A-0-0-00)

作者简介: 蔡李靖, 男, 博士生, 主要从事光谱成像技术与红外成像方面的研究。

导师简介: 曹汛, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事图像和视频处理、计算摄像学方面的研究。

time, stable and high-precision temperature measurement of miniaturized infrared thermal imager.

Key words: infrared thermal imager; temperature calibration; temperature compensation; long-term stability

0 引言

温度是反映物体状态的一种表现形式,可以在发生事故前起到预警效果,并指明发生故障的确切位置。比如在变电站中通过热场分析可以发现电压、电流异常导致的设备温度骤升现象,然而人工逐个设备检测效率低,通过红外测温的方式可以有效确定故障位置^[1]。在天然气或者其他 VOC(Volatile Organic Compounds) 气体泄漏时,传统点式、线式传感器易受环境影响存在误报警、漏报警与报警滞后等问题,由于 VOC 气体在红外波段存在特征吸收峰,利用红外热像仪可以快速监测定位泄漏源^[2]。在人体温度筛查过程中,传统接触式测温方式效率低下,采用非接触方式(如红外热像仪)可以实现大规模人体表面温度筛查^[3]。对于采用红外热像仪进行人体体温筛查的方式,高测温精度是一项重要指标。大部分红外热像仪需要利用黑体进行实时校正,然而采用基于黑体的红外热像仪大大降低了设备便携程度,而且只适用于固定场景的测温,其通用性较差。于是,无黑体式红外热像仪逐渐开始被使用。如果没有黑体进行实时校正,则对红外热像仪进行温度标定与补偿至关重要,环境中存在高温物体^[4]、目标距离^[5]、空气粉尘^[6]等因素,对于红外测温有一定程度的影响。刘斯尧等^[7]采用多光谱测温的方法可以有效测量高温物体,然而其结构复杂,便携程度差。针对于单路红外热像仪的补偿,石东平等^[8]采用反射温度补偿或入射温度补偿方法,莫然^[9]采用测距、温度、湿度等传感器方法进行温度校正。然而这种补偿技术需要考虑多种因素,比较复杂。

文中提出一种高精度测温标定技术,利用普朗克定律的简化推导,通过多个黑体标定构建目标温度与辐射量的先验关系,并基于牛顿冷却定律对温度衰减与时间关系进行非线性建模,得到补偿曲线来减小温度测量的相对误差,通过上述方法可以提高小型化红外热像仪测温精度,同时使用时无需黑体与多传感器辅助,并且可以长时稳定进行温度测量。

1 热像仪测温原理

普朗克定律指明了黑体发射辐射量的功率密度曲线与波长和温度的关系:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

式中: λ 为波长; T 为黑体温度; c 为光速; h 为普朗克常数, $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; k 为玻耳兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

被测目标物体由于温度的不同存在自身辐射差异,而材质的不同会导致目标物体表面反射率不同,同时反射的环境辐射也存在差异。热像仪接收到的辐射包括被测目标自身辐射、环境反射辐射、大气辐射以及热像仪内部辐射。在制冷型红外探测器中存在制冷机结构将热像仪内部辐射减弱;在非制冷型探测器则会存在盲电阻等结构构建电桥将该辐射抵消^[10]。因此只考虑被测目标自身辐射、环境反射辐射、大气辐射对红外热像仪的影响。

如图 1 所示, F_{ori} 、 F_{atm1} 与 F_{atm2_ori} 为目标物实际辐射量、目标附近气温发出辐射量、传播路径气温实际辐射量, F_{ori} 、 F_{atm1} 与 F_{atm2_ori} 分别与目标温度 T_{tar} 、目标附近气体温度 T_{atm1} 、传播路径气体温度 T_{atm2} 有关。 F_{tar} 与 F_{atm2} 为目标发出辐射量与传播路径发出辐射量, F_{ref} 为目标物反射环境温度的辐射量。 F_{atm_trans} 与 F_{ref_trans} 分别为目标物发出辐射量与目标物反射环境温度的辐射量经过传播路径后到达红外热像仪窗口的辐射量:

$$F_{tar} = \varepsilon F_{ori} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T_{tar}) d\lambda = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT_{tar}}} - 1} d\lambda \quad (2)$$

$$F_{atm1} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T_{atm1}) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT_{atm1}}} - 1} d\lambda \quad (3)$$

$$F_{atm2} = (1 - \tau) F_{atm2_ori} = (1 - \tau) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T_{atm2}) d\lambda = (1 - \tau) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT_{atm2}}} - 1} d\lambda \quad (4)$$

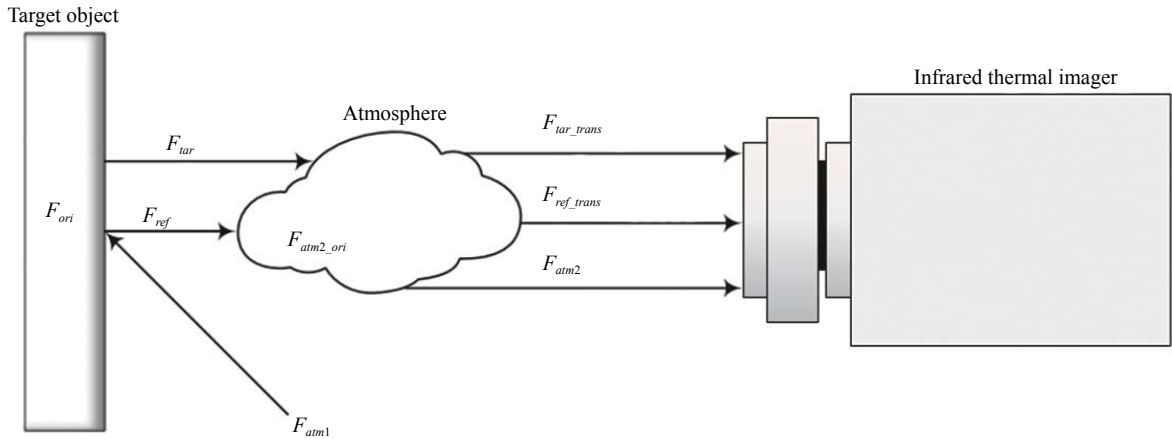


图 1 红外热像仪接收辐射量示意图

Fig.1 Schematic diagram of radiation received by infrared thermal imager

$$F_{ref} = (1 - \varepsilon)F_{atm1} \quad (5)$$

$$F_{tar_trans} = \tau F_{tar} \quad (6)$$

$$F_{ref_trans} = \tau F_{ref} \quad (7)$$

式中: ε 为目标物体的发射率; τ 为大气传播的透射率; λ_1 与 λ_2 之间为红外热像仪可接收的波段范围。

红外热像仪最终接收到的总辐射量 F 为:

$$F = F_{ref_trans} + F_{tar_trans} + F_{atm2} = \tau(1 - \varepsilon)F_{atm1} + \tau\varepsilon F_{ori} + (1 - \tau)F_{atm2_ori} \quad (8)$$

若要测量目标温度,则需要得到目标物体实际辐射量 F_{ori} :

$$F_{ori} = \frac{1}{\tau\varepsilon}F - \frac{\tau(1 - \varepsilon)}{\tau\varepsilon}F_{atm1} - \frac{1 - \tau}{\tau\varepsilon}F_{atm2_ori} \quad (9)$$

又由于近距离可以忽略大气衰减^[1],即 $\tau = 1$ 。代入公式 (9) 得:

$$F_{ori} = \frac{1}{\varepsilon}F - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}F_{atm1} \quad (10)$$

考虑到探测器的波长响应 $R(\lambda)$, 目标实际辐射量 F_{ori} 在探测器上的响应值 S_{ori} 为:

$$S_{ori} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_{tar}}} - 1} R(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

由公式 (11) 可知目标温度 T_{tar} 与探测器响应值 S_{ori} 存在对应关系, 对公式 (11) 进行泰勒展开近似可得:

$$S_{ori} = k \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_{tar}}} - 1} \Big|_{\lambda=\lambda_0} + O \quad (12)$$

参数项合并可得近似公式:

$$S_{ori} = \frac{R}{e^{\frac{B}{T_{tar}}} - 1} + O \quad (13)$$

其中

$$R = k \frac{2hc^2}{\lambda_0^5} R(\lambda_0) \quad (14)$$

$$B = \frac{hc}{\lambda_0 K} \quad (15)$$

式中: R 代表响应参数, 与镜头、滤光片、探测器响应曲线相关; B 为温度特征参数; O 为偏置项。

同理, 对公式 (11) 进行高阶近似可得

$$S_{ori} = \frac{R}{e^{\frac{B}{T_{tar}}} - 1} + O + \frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0^2} \left(e^{\frac{2B}{T_{tar}}} - 2e^{\frac{B}{T_{tar}}} + 1 \right) \left(\frac{RB}{T_{tar}} e^{\frac{B}{T_{tar}}} - 5Re^{\frac{B}{T_{tar}}} + 5R + R_2(e^{\frac{B}{T_{tar}}} - 1) \right) \quad (16)$$

其中

$$R_2 = \frac{R'(\lambda_0)}{\lambda_0^4} \quad (17)$$

式中: R 和 B 关系式同公式 (14)、(15)。

维恩位移定律指明了黑体辐射温度与辐射量最大值对应的波长的关系:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (18)$$

式中: λ_{max} 为辐射的峰值波长; T 为黑体的绝对温度; b 为维恩位移常数, 常数值大小为 $2.8978 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

在人体表面测温过程中, 人体温度在 $36 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$, 由维恩位移定律 (公式 (18)) 可知峰值波长 λ_{max} 范围为 $9.34 \sim 9.37 \text{ } \mu\text{m}$, 当目标温度 T_{tar} 为 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 由公式 (15) 可得最佳温度特征参数 $B = 1542$ 。

在合理估计温度特征参数 B 后, 由公式 (13) 可知

目标温度 T_{tar} 与其在探测器上的辐射量响应值 S_{ori} 可以近似为与响应参数 R 和偏置 O 相关的非线性函数。而探测器实际响应值 S 由红外热像仪最终接收到的总辐射量 F 决定, 另外目标附近气温发出辐射量 F_{ami} 在探测器上的响应值为 S_{ami} , 由公式 (10) 可知 S_{ori} 与 S 、 S_{ami} 的关系为: 通过合理考虑环境辐射量 F_{ami} 在探测器上的响应 S_{ami} , 可得到目标温度 T_{tar} 与探测器实际响应值 S 的对应关系, 从而降低测量误差, 提高红外热像仪测温精度。

2 测温标定补偿方法及步骤

2.1 测温标定

红外测温探测器采用 FLIR Lepton 3.5 红外热成像热感测温摄像头模块, 通过设计外围电路来自制红外热像仪。黑体采用泰安德美 DY-HTX1, 其发射率 ε 为 0.98。设备摆放位置如图 2 所示。由公式 (17) 可知人体目标温度 T_{tar} 与探测器实际响应值 S 可通过测温标定得到对应的拟合关系。实验步骤如下:

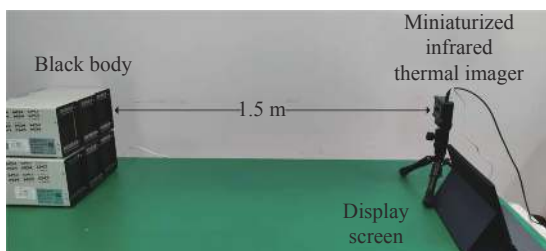


图 2 测温标定装置

Fig.2 Temperature measurement calibration device

(1) 考虑到室内测温实际使用需求, 模拟红外热像仪使用过程真实场景, 将恒温室温度设为通常室内使用场景温度, 一般情况下室内使用环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 黑体与红外热像仪距离约 1.5 m 。

(2) 为了得到环境温度 T_{ami} 在探测器上的响应值 S_{ami} , 采用六台黑体作为测温目标, 将每台黑体目标温度 T_{tar} 均设为上述恒温室设置的环境温度 T_{ami} , 在温度相同情况下根据普朗克辐射定律环境气温辐射量等于黑体目标辐射量 $F_{ami} = F_{ori}$ 。由于探测器响应 S 与辐射量 F 仅仅是光学衰减的差异, 因此在等式 (10) 中, 将 F 替换为 S 等式也成立。因此在探测器上的响应 $S_{ami} = S_{ori}$ 。由公式 (10) 可知, 当 $S_{ami} = S_{ori}$ 时, 探测器实际响应值 $S = S_{ami}$ 。利用红外热像仪测量多

个黑体预设环境温度下的辐射量在红外热像仪探测器上的响应值, 从而得到公式 (10) 中 S_{ami} 的值来排除环境温度的干扰。在环境温度变化不大的情况下, S_{ami} 可以较准确估计环境温度所带来的辐射量影响。

(3) 根据 GB/T 19146—2010 要求, 将黑体目标温度 T_{tar} 分布设置为 28 、 33 、 36 、 37 、 38 、 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 $36\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内设置的温度较密集, 对曲线拟合过程比重更大, 因此在实际使用时 $36\sim 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内测温精度更高, 符合人体表面测温应用。利用步骤 (2) 中测量得到的环境气温辐射量在红外热像仪探测器上的响应值 S_{ami} , 结合公式 (10) 可排除环境气温辐射量的影响, 并利用公式 (13) 将黑体目标温度 T_{tar} 与其对应的红外热像仪探测器响应值 S 进行非线性拟合, 即通过测温标定得到公式 (13) 非线性函数中的响应参数 R 和偏置 O 的值, 从而得出 $28\sim 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度段内目标温度 T_{tar} 与在红外热像仪探测器上响应值 S 的拟合关系。理想黑体发射率 $\varepsilon = 1$, 而根据此次使用的黑体的说明文件可知, 其真实发射率 $\varepsilon = 0.98$, 人体皮肤表面发射率也为 0.98 , 实验所用黑体与人体皮肤发射率接近, 符合实际使用测量人体表面温度时的发射率。

2.2 温度补偿

在实际使用过程中, 对于红外测温探测器 FLIR Lepton 3.5, 其红外焦平面成像稳定性需要靠挡片校正进行保证。而挡片校正的机械转动会产生一定热量, 因此在挡片校正时会导致短时间红外热像仪探测器表面附近升温。如图 3 所示, 图中曲线为已完成测温标定的探测器在执行挡片校正后 180 s 内对 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黑体温度的测量值。该温度测量曲线在挡片校正后会有明显的温度升高, 并在前 60 s 测量温度与实际温度有着较大的偏差。

由牛顿冷却定律^[12]可知, 温度与时间呈指数衰减关系。因此可以把图 3 所示的挡片校正引起的黑体温度测量结果升高后随时间恢复正常温度的曲线根据指数衰减规律进行拟合。根据这一非线性关系, 对红外热像仪挡片校正后一段时间内的温度漂移进行补偿。

实验步骤: (1) 红外热像仪开机稳定后进行挡片校正, 立刻开始获取对一黑体源的测量温度。此处可以以 1 s 为时间间隔, 连续获取对该黑体源 100 s 内的温度测量值。待红外热像仪稳定后重复执行此操作,

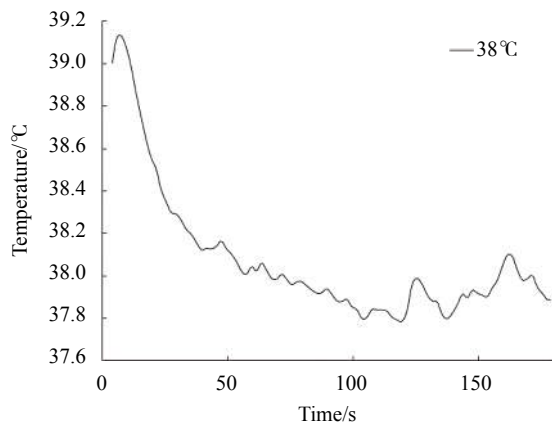


图 3 挡片校正后 38 °C 黑体测温曲线

Fig.3 Blackbody temperature measurement curve of 38 °C after calibration with baffle

获得多组测量温度。

(2) 对于每组测量温度, 确定出该组温度测量值中的最小值, 该段温度测量值分别与该最小值进行减法运算, 获得差值后进行非线性拟合。建立时间与差值坐标系, 将差值与对应时间点置入坐标系中, 根据牛顿冷却定律采用 $T' = Ae^{Bx} + C$ 公式进行拟合, 即可得到需要补偿的温度差值与时间的关系。此处的温度差值是指实际测量与标准温度的差值, 即实际使用时的补偿值, 其中, T' 为温度补偿值, A 、 B 、 C 为非线性指数函数的参数。

(3) 当待标定的红外热像仪检测到挡片校正信号后, 利用非线性补偿公式对红外热像仪测量得到的温度数据进行补偿, 得到最终补偿后的温度值 $T = T'' - T'$ 。其中, T 为补偿后红外热像仪输出的温度, T'' 为补偿前红外热像仪实际测量得到的温度, T' 为温度补偿值。此处需要注意, 挡片校正后前几秒处于升温状态, 不应参与拟合。补偿应从温度开始衰减时进行补偿, 针对升温状态的补偿可采用理论补偿曲线间隔两秒的补偿值进行逆序补偿。

探测器挡片校正机械结构设计导致温度补偿的需要, 与测温标定无关。红外热像仪随着开机时间增加, 输出也会存在一定漂移情况, 文中采用的 FLIR Lepton 3.5 漂移较少, 无需进行相关补偿, 故该问题不在讨论范围内。完成测温标定与温度补偿后, 可以减小红外热像仪测温误差, 从而实现长时间稳定高精度测温。

3 结论和分析

3.1 测温标定结果

图 4 所示为测温标定的参数拟合曲线。横坐标为温度, 纵坐标为红外热像仪探测器响应值, 根据公式 (13) 与公式 (18) 可以得到温度与响应值的近似关系, 通过参数拟合的方式可以计算得到温度与辐射量非线性对应关系中的 R 和 O 参数, 根据 2.1 节测温标定中的实验步骤, 在黑体目标温度分别为 28、33、36、37、38、42 °C 测定红外热像仪探测器响应值, 并代入公式 (13) 对目标温度与红外热像仪探测器响应值通过最小二乘法进行非线性拟合。由非线性拟合结果可得探测器响应参数 $R = 416\ 598$ 、偏置项 $O = 1\ 190$ 。在测温标定后通过对一组不同设定温度的黑体进行拍摄来对标定效果进行测试。测试时黑体离红外热像仪约 1.5 m, 将多个黑体重新排列, 第一行黑体设置温度分别为 33、36 °C, 第二行设置温度分别为 37、38、42 °C。图 5(a) 展示了红外热像仪原始测温结果, 标定前相对误差分别为 2.85%、0.97%、0.49%、0.50% 和 1.45%, 可以看出标定前红外热像仪测温结果在中心温度段 36~38 °C 相对误差较低, 而偏离中心温度段越远, 相对误差越大, 测温效果越差。图 5(b) 展示了红外热像仪测温标定后的结果, 可以看出对每个黑体测定的温度与真实温度绝对误差保持在 ± 0.3 °C 以内。标定后的相对误差分别为 0.12%、0.28%、0.20%、0.29% 和 0.69%。相对误差比较结果如表 1 所示。从测温标定前后的绝对误差和相对误差

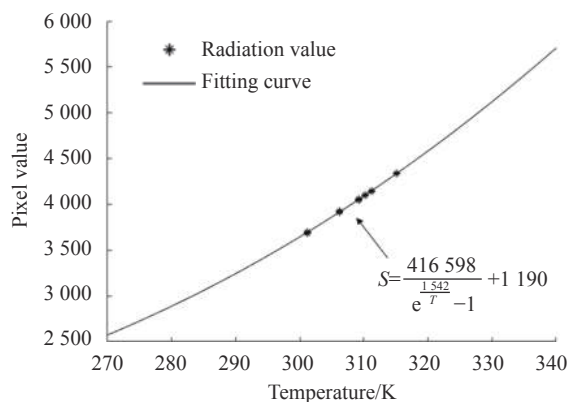
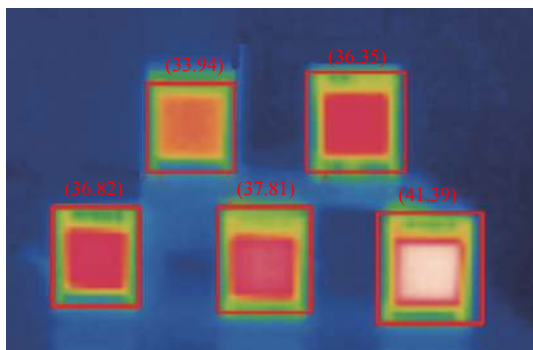


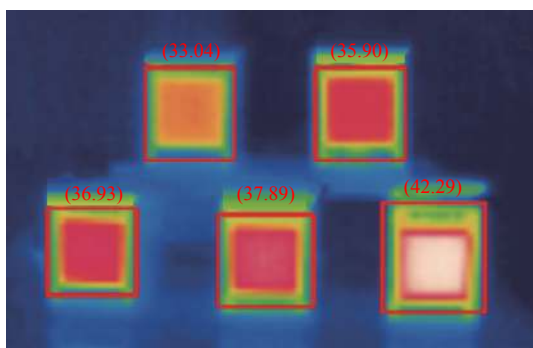
图 4 测温标定前后效果对比

Fig.4 Comparison of effects before and after temperature measurement calibration



(a) 标定前测温结果

(a) Temperature measurement results before calibration



(b) 标定后测温结果

(b) Temperature measurement results after calibration

图 5 测温标定拟合结果

Fig.5 Fitting results of temperature measurement

表 1 测温标定前后相对误差比较

Tab.1 Comparison of relative errors before and after calibration of temperature measurement

Device	Before calibration	After calibration
Blackbody1 (33 °C)	2.85%	0.12%
Blackbody2 (36 °C)	0.97%	0.28%
Blackbody3 (37 °C)	0.49%	0.20%
Blackbody4 (38 °C)	0.50%	0.29%
Blackbody5 (42 °C)	1.45%	0.69%

差可以看出,经过标定后的红外热像仪可以显著减小测温误差,并且在偏离中心温度较远的地方也可实现高精度测温。

公式 (13)、(16) 为公式 (11) 不同阶泰勒展开近似形式,引入拟合优度 R^2 来评价两种形式的拟合结果。理论上,拟合优度 R^2 值越高,拟合度较好。利用公式 (13) 进行拟合,计算其拟合优度 $R_1^2 = 0.999\ 576$ 。利用公式 (16) 进行拟合,计算其拟合优度 $R_2^2 = 0.999\ 587$ 。二者结果相比,拟合优度值差异性不大。但是公式

(16) 为超越方程,在实际使用过程中,从探测器响应值 S_{ori} 计算得到目标温度 T_{tar} 存在较大难度,若采用近似求解则又会损失精度,因此,在实际测量过程中使用公式 (13) 进行近似即可。

3.2 温度补偿结果

如图 3 所示,挡片校正时会导致短时间的升温。参照 2.2 节中的温度补偿步骤,得到温度补偿值 T' 曲线如图 6 所示。选取三个黑体的挡片校正后温度曲线进行拟合,由于挡片校正后实际温度曲线前 5 s 内仍处于温度升高阶段,因此选取 6~100 s 时间段内温度通过最小二乘法进行拟合,得到非线性函数 $T' = Ae^{Bx} + C$ 中的参数值,从拟合结果可以看出,挡片校正后的温度衰减满足牛顿冷却定律,采用拟合曲线进行温度补偿可以满足红外热像仪测温稳定性要求。

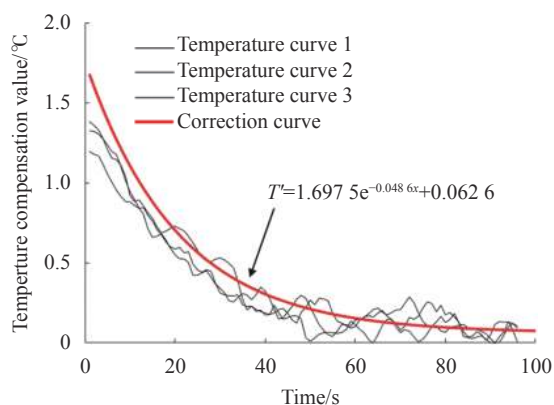


图 6 温度补偿前后测温结果

Fig.6 Temperature measurement results before and after temperature compensation

图 7(a) 为 33、36、37、38、42 °C 挡片校正后未进行温度补偿的测温结果曲线图,从图中可以看出挡片校正后 100s 内存在温漂现象,影响红外热像仪测温功能稳定性。图 7(b) 为 33、36 °C、37、38、42 °C 挡片校正后进行温度补偿的测温结果曲线图。从图中可以看出温度补偿后虽然前几秒会有温度波动,但是波动范围在可接受范围内。

3.3 长时间运行结果

将完成测温标定和温度补偿后的红外热像仪置于实际场景进行长时间运行测试,选择的红外热像仪监测的场景为不定时会有人经过的走廊,会对场景中背景温度分布进行干扰,在走廊中放置有六个黑体用于对红外测温热像仪的测试,设定温度分别为

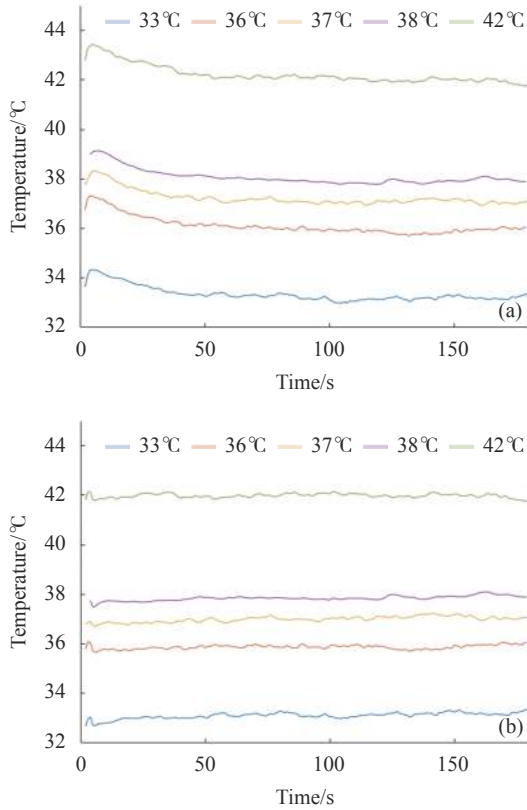


图 7 温度补偿值拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of temperature compensation

28、33、36、37、38、42 °C。

图 8 为已完成测温标定和温度补偿的红外热像仪对六个黑体的长时间测温结果。可以看出,红外热像仪测量的温度在长时间内保持相对稳定,不会存在偶尔温度突变与测温不准的情况,即使画面中背景有温度分布变化,测温结果也能保持相对稳定。

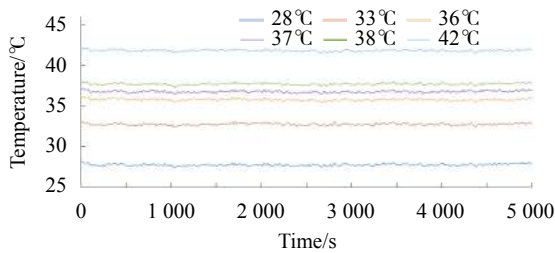
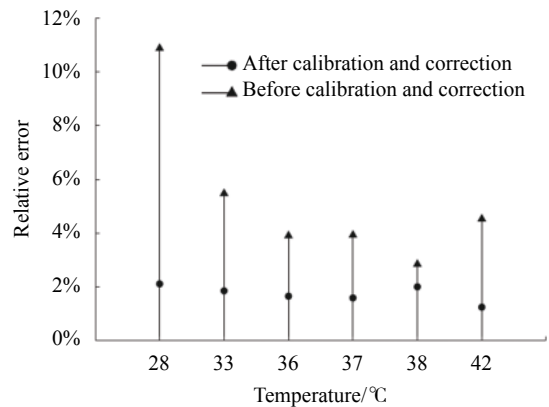


图 8 测温标定和温度补偿后的测温曲线

Fig.8 Temperature curve after calibrating and correcting with compensation

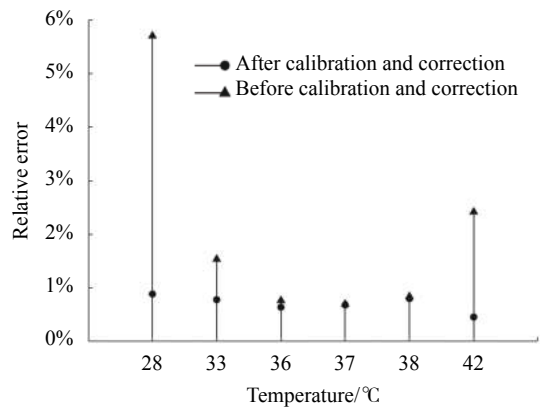
图 9(a)、(b) 分别为未进行测温标定和温度补偿的红外热像仪和已进行测温标定和温度补偿的红外热像仪对六个黑体的长时间测温结果的最大相对误差

差与平均相对误差。由图 9(a)可知,由于温度漂移的影响,经过测温标定与温度补偿后的红外热像仪可以明显降低每个目标黑体测量温度的最大相对误差。从图 9(b)可以看出,在 36~38 °C 范围内测温标定与温度补偿前后测温结果的平均相对误差相差不大。而考虑到整个温度范围,测温标定与温度补偿前的平均相对误差为 1.99%,测温标定与温度补偿后的平均相对误差为 0.71%。综合以上实验结果进行测温标定和温度补偿后的红外热像仪能够在比较复杂的环境下长时间稳定运行,虽然设备长时间运行过程中与刚完成测温标定时的测温精度有一定差距,但是相对于未标定和未补偿的结果来说,测温性能得到了大大提升,可将红外热像仪测温平均相对误差长时稳定保持在 0.9% 以内,相比于标定补偿前平均相对误差有效降低 64%。因此该标定补偿方法可以有效增加测温



(a) 最大相对误差

(a) Max relative error



(b) 平均相对误差

(b) Mean relative error

图 9 测温曲线相对误差

Fig.9 Relative error of temperature curves

精度,并且缓解挡片校正带来的温度变化影响,从而在 28~42 °C 范围内实现长时间稳定高精度测温。

4 结 论

文中提出一种红外热像仪测温标定与温度补偿方法,介绍了算法原理、流程和结果。测试结果表明该方法能够减小测温误差,实现长时间稳定高精度测温。由于该方案简单有效、无需采用其他传感器进行补偿,且无需黑体在使用过程中进行实时校正,因此稳定性、实时性和便携程度高。该方案能够解决实时大规模人体表面温度筛查过程中设备安装条件复杂、测温精度不高、稳定性差等问题,且作为小型化设备易集成到其他设备作为实时温度测量装置。

当然,该方案也有不足:(1)依赖标定环境,对于恒温室和黑体数量要求高,且标定过程直接影响到最终测温结果。(2)距离影响大,目前固定采用 1.5 m 进行测量能够满足人体表面温度筛查,但是改变距离后需要加入距离校正因子进行校正,后续将继续研究结合 TOF 实现自动距离测量,减弱距离影响,提高设备通用性。(3)文中仅考虑人体表面测温,但是针对于其他目标测量也有一定意义。可以将红外热像仪进行多组参数标定。一组粗标定进行温度范围选择,另外多组精细标定进行测温精度提升。进行二次计算,第一次实现温度范围选择,第二次选择该范围内标定参数进行计算,从而实现对于所有目标物体的实时高精度测温。

参考文献:

- [1] Zhou Jingsong, Yu Jingfeng, Tang Shengfeng, et al. Research on temperature early warning system for substation equipments based on the mobile infrared temperature measurement [J]. *Journal of Electric Power Science And Technology*, 2020, 35(128): 165-170. (in Chinese)
- [2] Zhang Xu, Jin Weiqi, Li Li, et al. Research progress on passive infrared imaging detection technology and system performance evaluation of natural gas leakage [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S2): S204001. (in Chinese)
- [3] Ge Zexun. Research on medical infrared thermometer and the key technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [4] Zhang Jian, Yang Li, Liu Huikai. Effect of environmental object on infrared temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(5): 419-422. (in Chinese)
- [5] Du Yuxi, Hu Zhenqi, Ge Yunhang, et al. Distance influence and compensation of infrared temperature measurement with different intensity heat sources [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(322): 85-90. (in Chinese)
- [6] Pan D, Jiang Z, Gui W, et al. Influence of dust on temperature measurement using infrared thermal imager [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20(6): 2911-2918.
- [7] Liu Siyao, Wang Jinsong, Sun Yanjun, et al. Calibration for multispectral radiation temperature measuring system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 42(2): 65-68. (in Chinese)
- [8] Shi Dongping, Wu Chao, Li Zijun, et al. Analysis of the influence of infrared temperature measurement based on reflected temperature compensation and incidence temperature compensation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2321-2326. (in Chinese)
- [9] Mo Ran. The design of high-precision infrared temperature measuring system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [10] Li Yu, Fang Hui, Tan Guo, et al. Development of high-performance 17 μm uncooled VO_x infrared focal plane array [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(9): 785-793, 797. (in Chinese)
- [11] Sun Peng. Physical model building and demonstration of infrared thermometry[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [12] Vollmer M. Newton's law of cooling revisited [J]. *European Journal of Physics*, 2009, 30(5): 1063.