

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209650

基于方向发射率校正的红外测温补偿方法*

潘冬, 蒋朝辉, 桂卫华

(中南大学自动化学院 长沙 410083)

摘要: 红外热成像仪具有实时在线、非接触获取被测对象二维温度分布等优点, 在钢铁、农业、电力电子等众多领域应用广泛。但是, 红外测温结果容易受到干扰因素的影响。针对方向发射率变化引起的红外测温误差, 本文提出了基于方向发射率校正的红外测温补偿方法。首先, 基于红外测温原理, 构建了针对方向发射率变化的红外测温补偿模型。其次, 为确定补偿模型中的方向发射率, 利用红外热像仪和激光扫描仪构建的三维热成像系统, 提出了基于参考体的方向发射率校正方法。然后, 通过多项式拟合确定方向发射率随视角变化的规律。实验结果表明所提红外测温补偿方法可以有效降低方向发射率变化造成的红外测温误差, 经过补偿温度后, 红外测温最大误差由 9.64℃ 降低为 2.97℃, 标准差由 3.57℃ 降低为 0.71℃。

关键词: 红外热成像; 方向发射率; 视角; 温度补偿; 参考体

中图分类号: TN21 TH811 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

An infrared temperature compensation method based on directional emissivity correction

Pan Dong, Jiang Zhaohui, Gui Weihua

(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The infrared thermal imager has advantages of real-time on-line, non-contact acquisition of the two-dimensional temperature distribution of the measured object, which is widely used in steel, agriculture, power electronics and other fields. However, infrared temperature measurement results are easily affected by interference factors. To address the infrared temperature measurement error caused by the change of directional emissivity, a temperature compensation method based on directional emissivity correction is proposed in this article. Firstly, based on the principle of infrared temperature measurement, an infrared temperature measurement compensation model for the change of directional emissivity is formulated. Secondly, to determine the directional emissivity in the compensation model, a 3D thermal imaging system constructed with an infrared thermal imager and a laser scanner is used, and a reference body-based directional emissivity correction method is proposed. Then, the law of the directional emissivity changing with the viewing angle is determined by polynomial fitting. Experimental results show that the proposed infrared temperature measurement compensation method is effective in reducing the infrared temperature measurement error caused by the change of directional emissivity. After temperature compensation, the maximum error of infrared temperature measurement is reduced from 9.64℃ to 2.97℃, and the standard deviation is reduced from 3.57℃ to 0.71℃.

Keywords: infrared thermography; directional emissivity; viewing angle; temperature compensation; reference body

0 引言

红外热成像仪具有非接触、非浸入、实时在线、无有害辐射、提供二维温度分布等优点, 吸引了学术界和工业

界的广泛研究与关注, 在钢铁、农业、电力电子、医疗辅助诊断等领域中有着众多的应用^[1-3]。尤其在 COVID-19 等疾病流行期间, 红外热成像技术被广泛应用于大型公共区域的高精度大规模人体体温筛查, 是疫情防控中必不可少的技术支撑^[4]。

收稿日期: 2022-04-20 Received Date: 2022-04-20

* 基金项目: 国家自然科学基金(61927803)、长沙市自然科学基金(kq2202075)项目资助

需要指出的是,由于红外热成像仪非接触式检测的特点,当其应用在复杂检测场景时,其测温结果容易受到一些因素的影响,如测温距离、视场角、粉尘、环境温度及发射率等^[5-7]。如何保证红外热像仪的测温精度是应用红外测温时面临的难点之一。根据影响因素的来源,本文将影响红外热像仪测温精度的因素分为三类:来自红外热像仪自身的影响因素,来自外部环境的影响因素,来自被测对象的影响因素。红外设备自身因素主要包括红外探测器自身辐射、红外探测器的非均匀性响应、红外设备内部的电路温漂、红外镜头视场角的大小、红外设备拍摄角度等。外部环境因素主要包括粉尘、环境温度、环境相对湿度、测温距离等。被测对象因素主要指被测对象的发射率。

国内外许多学者针对上述干扰影响因素,开展了大量的红外测温补偿方法研究,丰富了红外精确测温理论。本文从补偿手段的角度将这些补偿方法归为硬件补偿和软件补偿两类。硬件补偿主要通过增加红外热像仪机身硬件或引入外部辅助硬件来消除干扰因素的影响,如设计补偿电路,自动调节红外镜头,增加防护装置^[8-10]。硬件补偿增加了设备的复杂性和使用成本,并且新加的硬件可能会引入新的误差。因此,近些年软件补偿的研究较多。通常,软件补偿无须增加额外硬件,主要基于红外测温机理或测温数据来构建补偿模型来消除或减小干扰因素造成的红外测温误差^[11-12]。针对红外设备自身因素对红外测温影响,Dai等^[13]针对非制冷焦平面探测元非均匀响应的问题,利用多项式拟合方法对探测元的非均匀性进行校正。文献[14]构建了基于神经网络和回归的补偿方法以克服红外热像仪视场角和测温角度对红外测温误差的影响。针对外部环境因素的影响,Zhang等^[15]研究了大气透射率对红外测温精度的影响,推导了计算水蒸气、二氧化碳、气溶胶等透射率的经验公式,建立了大气透射率计算模型,然后对红外测温结果进行补偿。Guo等^[16]和Dai等^[17]将红外测温技术应用到回转窑的表面温度检测中,并通过多项式拟合、负指数函数拟合来补偿测温距离变化造成的红外测温误差。针对被测对象发射率的影响,Shen等^[18]分析了物体表面发射率对红外热像仪测量精度的影响,研究了材料表面状态、温度对发射率的影响,通过计算每个点对应的发射率以提高红外热像仪检测非稳态温度场时的测温精度。

上述研究为确保红外热像仪的测温精度提供了较好的理论和技术支撑,但是少有针对方向发射率变化造成的红外测温误差的研究。尤其当被测对象表面是非平面时,方向发射率随着视角变化而变化,导致红外热像仪获取的二维红外热图像存在系统误差。比如,在视角A时测量某个物体表面位置P处的温度为 T_A ,而在视角B测量时P处可能呈现出温度 T_B ^[19]。三维热成像技术结合

了红外热成像和三维重建的优点,可以获取被测对象的温度分布和几何结构信息。被测对象的三维结构为量化方向发射率提供了几何信息支撑,使得克服方向发射率随视角变化造成的红外测温误差进而获取准确的被测对象表面温度分布成为可能。为此,针对方向发射率变化造成的红外热像仪系统测温误差,本文提出基于红外测温机理的温度补偿方法,并结合三维热成像技术,提出了基于参考体的方向发射率校正方法,实现了对物体非平面表面温度分布的准确检测。

1 红外测温补偿方法

1.1 红外测温原理

根据普朗克定律^[20],一个表面温度为 $T(K)$ 的物体在波长 λ 的光谱辐射出射度可以表示为:

$$W(T) = \varepsilon(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon(\lambda)$ 表示物体的光谱发射率, C_1 为第一辐射常量, $C_1 = 3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$; C_2 为第二辐射常量, $C_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

根据基尔霍夫定律,物体的发射率等于其吸收率^[12]。不透明的被测对象的透射率可以看作是0,因此,被测对象的反射率可以表示为式(2)。同理,大气的光谱反射率可以看作是0,对应的大气发射率如式(3)所示。

$$\rho_0 = 1 - \varepsilon_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_a = 1 - \tau_a \quad (3)$$

式中: ε_0 和 ρ_0 分别表示被测对象的发射率和反射率, ε_a 和 τ_a 分别表示大气的发射率和透射率。

红外热像仪接收到的辐射亮度由3个部分构成:来自被测对象的辐射亮度、来自周围环境的辐射亮度和来自大气的辐射亮度。

$$W_{rd} = \varepsilon_0 \tau_a W_0 + \tau_a (1 - \varepsilon_0) W_u + (1 - \tau_a) W_a \quad (4)$$

式中: W_0 表示与被测对象相同温度的黑体的辐射强度, W_u 表示与周围环境温度相同的黑体的辐射强度, W_a 表示与大气温度相同的黑体的辐射强度。

本文利用视角 θ 表示观察光线方向向量和物体表面单位法向量之间的夹角。由于红外热像仪工作在固定的波段,且往往用于较小视角 θ 情形下的温度检测,因此,通常认为被测物体表面的发射率为常数。当红外热像仪被用于较大视角情形下的温度检测,则需获取不同视角下被测对象的方向发射率 $\varepsilon_0(\theta)$,以便进行准确测温。此时,式(4)变为:

$$W_{rd} = \varepsilon_0(\theta) \tau_a W_0 + \tau_a (1 - \varepsilon_0(\theta)) W_u + (1 - \tau_a) W_a \quad (5)$$

基于 Sakuma-Hattori 方程^[21], 可以将红外探测器的检测信号表示为:

$$U_D = \varepsilon_0(\theta) \frac{R}{e^{B/T_0} - F} + (1 - \tau_a) \frac{R}{e^{B/T_a} - F} + \tau_a(1 - \varepsilon_0(\theta)) \frac{R}{e^{B/T_u} - F} \quad (6)$$

式中: T_0 表示被测对象的表面温度, T_u 表示周围环境温度, T_a 表示大气温度, R 是关于红外热像仪积分时间和工作波长的函数, B 是红外热像仪工作波长的函数, F 为正值, $F \approx 1$ 。

当使用红外热像仪近距离测温时, 可以近似认为大气透射率为 1。在这种情形下, 式(6)可以简化为:

$$U_D = \varepsilon_0(\theta) \frac{R}{e^{B/T_0} - F} + (1 - \varepsilon_0(\theta)) \frac{R}{e^{B/T_u} - F} \quad (7)$$

进而可以推导出被测对象表面温度的红外检测模型为:

$$T_0 = \frac{B}{\ln \left\{ \frac{\varepsilon_0(\theta) \times R}{U_D - [1 - \varepsilon_0(\theta)] \frac{R}{e^{B/T_u} - F}} + F \right\}} \quad (8)$$

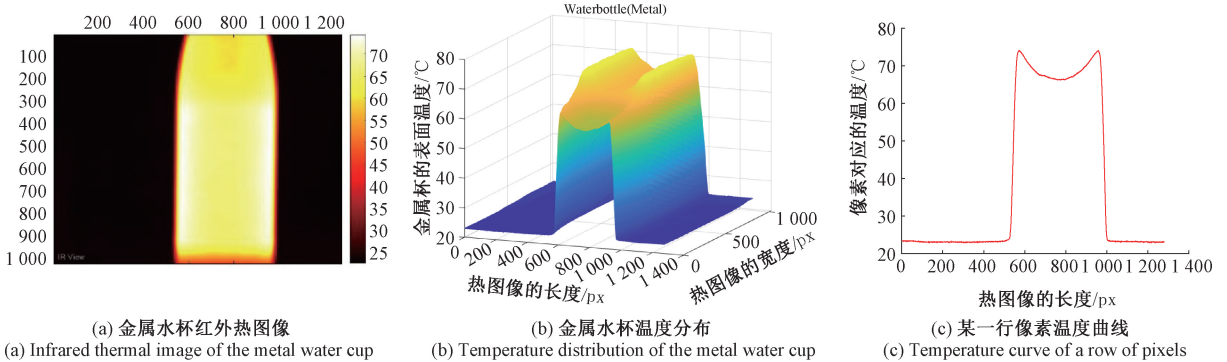


图1 金属水杯温度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the temperature of the metal water cup

1.3 红外温度补偿模型的构建

当利用红外热像仪进行温度检测时, 只能设定一个发射率, 由于被测物体的三维形状差异, 不同位置处的方向发射率并不一致。因此, 被测物体表面的方向发射率越接近设定发射率, 测温结果越准确, 反之, 被测物体表面的方向发射率与设定发射率差异越大, 测温结果的误差越大。图1所示的金属水杯测温实验便是一个很好的示例。

为了获取准确的红外测温结果, 必须对方向发射率变化造成的红外测温误差进行补偿。为此, 本文提出了基于红外测温原理的温度补偿模型, 其主要思想是基于

1.2 方向发射率对红外测温结果的影响

方向发射率与波长、检测视角和表面温度都有关, 但在计算方向发射率时, 考虑到红外热像仪是工作在一定波段内, 且被测对象的表面温度也在一定温度范围内, 故常常假设波长和表面温度对发射率的影响较小, 主要考虑检测视角对方向发射率的影响。

当视角 θ 发生变化时, 方向发射率会发生改变。根据红外测温模型(式(8))可知, 当发射率发生变化时, 红外测温结果也将变化。需要指出的是, 使用红外热像仪测温时, 发射率往往是固定的, 当被测对象不同位置处的方向发射率变化时, 若不针对方向发射率进行调整, 显然, 红外测温结果将存在误差。因此, 物体表面上 A 点的温度和 B 点的温度可能是相同的, 但由于视角 θ 造成的方向发射率差异, 导致两点的温度之间存在差异, 图1很好地显示了这种现象。图1(a)所示的圆柱形金属水杯装入了具有一定温度的水, 理论上金属水杯横向四周的温度是相同的, 但是由于其圆柱形状, 其横向四周的温度存在显著的差异, 如图1(b)所示。图1(c)显示了金属水杯某一行横向像素对应的温度分布, 从图中可知, 这一行像素中的最大温度值(位于金属水杯的两边)与最小温度值(位于金属水杯的中间)的差异十分显著。

红外测温原理, 同时结合被测对象不同位置处的方向发射率, 来构建温度补偿模型, 实现对被测对象不同位置处温度的精准补偿。

若已知被测物体方向发射率 ε 与视角 θ 之间的函数关系 $\varepsilon(\theta)$, 则可以根据红外测温模型(式(8))对原始的红外测温进行补偿。当方向发射率 $\varepsilon(\theta)$ 发生变化时, 若没有及时调整 $\varepsilon(\theta)$, 则红外热像仪的实测温度将含有误差。本文将带有误差的实测结果表示为 T'_0 , 带误差的方向发射率记为 $\varepsilon(\theta_0)$ 。尽管 T'_0 含有误差, 但 T'_0 仍然反映了红外测温装置接收到的红外辐射。因此, 根据实测结果 T'_0 和式(7), 可以算得该温度对应的红外测温检测

信号。

$$U'_d = \varepsilon(\theta_0) \frac{R}{e^{B/T_0} - F} + [1 - \varepsilon(\theta_0)] \frac{R}{e^{B/T_u} - F} \quad (9)$$

$$T_0 = \frac{B}{\ln \left\{ \frac{\varepsilon(\theta_1) \times R}{\varepsilon(\theta_0) \frac{R}{e^{B/T_0} - F} + [1 - \varepsilon(\theta_0)] \frac{R}{e^{B/T_u} - F} - [1 - \varepsilon(\theta_1)] \frac{R}{e^{B/T_u} - F} + F \right\}} \quad (10)$$

式(10)为针对方向发射率变化的红外测温补偿模型。当已知被测对象不同位置处的方向发射率时,便可根据式(10)对带误差的实测温度进行补偿,从而获取准确的被测物体表面温度分布。

1.4 方向发射率的校正

基于红外温度补偿模型(式(10)),便可以得到不同位置处准确的红外测温结果。然而 $\varepsilon(\theta)$ 的确定并非易事,常常需要专业检测装置来检测,在实际应用中往往不具备这种发射率检测条件。为此,本文提出了一种实用的方向发射率计算方法,先确定被测对象不同位置处的检测视角,然后确定该视角下被测对象对应的方向发射率。

为了确定被测对象不同位置处的检测视角,本文利用激光扫描仪和红外热像仪构建了三维热成像系统。激光扫描仪可以获取检测对象的三维模型,红外热像仪可以获取被测对象的表面二维温度分布。表1显示了激光扫描仪和红外热像仪的技术参数。

表1 设备技术参数

Table 1 Technical parameters of devices

设备	参数	
激光扫描仪	型号	Creaform Goscans 50
	工作距离/mm	150~450
	分辨率/mm	0.5
	精度/mm	0.1
红外热像仪	型号	Flir X8501sc
	测温范围/℃	-20~650
	分辨率	1 280×1 024
	测温精度/℃	±1

本文直接采用激光扫描仪 Creaform Goscans 50 获取被测对象的三维点云及其单位法向量,利用红外热像仪获取被测对象表面的红外热图像。然后,采用投影变换来确定红外热图像像素点与三维点云中顶点间的映射关系,进而确定被测对象不同位置处的检测视角。

设被测对象某个三维顶点为 $P^w = (x^w, y^w, z^w)$, 可以通过下式来获取被测对象三维顶点在红外热图像中的对应点 $p^i = (u, v)$ 。

根据方向发射率随视角 θ 的变化规律,得到正确的方向发射率 $\varepsilon(\theta_1)$,再结合上述求得的检测信号 U'_d 和式(8),便可计算得到校正方向发射率后准确的测温结果。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A [R, t] \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: s 为尺度因子, A 为红外热像仪的内参数, R, t 为红外热像仪的外参数。

由于红外热像仪与可见光相机成像方式的差异,难以直接采用常用于标定可见光相机的棋盘格来标定红外热像仪,必须设计合适的标定板以获取红外热像仪的内参数。本文基于红外热像仪的测温原理,同时借鉴可见光相机标定用的棋盘格,设计了能够用于红外热像仪标定的特殊棋盘格,不需要使用额外的加热装置来形成不同的温度分布。该棋盘格由表面光滑的抛光铝板制成,然后在其表面间隔贴上发射率较高的黑胶,制成如图2(a)所示的棋盘格,棋盘格中白色区域为抛光铝板,其发射率约在0.05左右,棋盘格中黑体区域为黑胶,其发射率约为1。

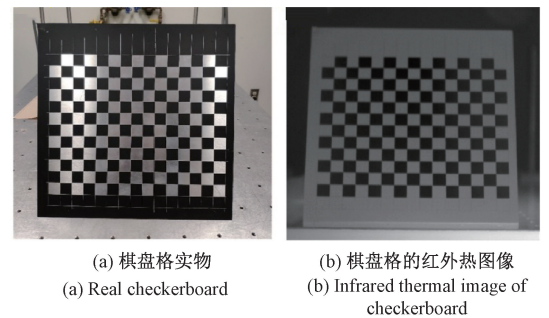


图2 棋盘格标定

Fig. 2 Checkerboard calibration experiment

当使用红外热像仪检测该标定板时,将红外热像仪的发射率设定为1,即黑胶的发射率,可以得到如图2(b)所示红外热图像。在红外热图像中温度高的像素点亮度较高,颜色越白,温度低的像素亮度较低,颜色较暗。在图2(b)中,尽管该棋盘格表面温度是相同的,但由于黑胶发射率高于铝板发射率,故在红外热图像上表现为黑胶区域的检测温度高于铝板区域的检测温度,从而形成了类似可见光棋盘格图像的黑白相间效果,在黑白棋盘格相间位置处形成了便于检测的特征点。调整该棋盘格

的方位,可以获取不同角度和位置下的棋盘格红外热图像。借助 MATLAB 中的单相机标定函数便可以获取红外热像仪的内参数。

对于红外热像仪的外参数标定,本文采用了一种基于轮廓内填充度的外参数标定方法^[22]。这种方法适用于被测对象在红外热图像中有清晰轮廓的情形,以便能够区别被测对象和背景。在大部分红外测温场景中,被测对象与背景温度不一样,因此,从红外热图像中提取被测对象的轮廓是可行的。该方法只需要从红外热图像中提取被测对象的轮廓,并不需要提取被测对象三维模型的轮廓,再根据温度映射模型(式(11)),实现三维点云向红外热图像映射,然后构建轮廓内填充度目标函数,并借助优化算法来寻找最佳的外参数。

设视角 θ 为 0 时的方向发射率为红外热像仪的设定发射率,因此,被测对象表面视角 θ 为 0 的位置处的测温结果最准确。视角 θ 可以根据红外热像仪的观察光线方向向量和和物体表面单位法向量的夹角来表示,如图 3 所示。

$$\theta = \arccos \left| \frac{\mathbf{PO} \times \mathbf{n}}{|\mathbf{PO}|} \right| \quad (12)$$

式中: \mathbf{PO} 表示连接被测对象表面 P 点和红外热像仪光心 O 的向量, \mathbf{n} 表示被测对象表面 P 点处的法向量。

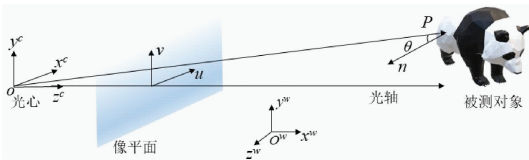


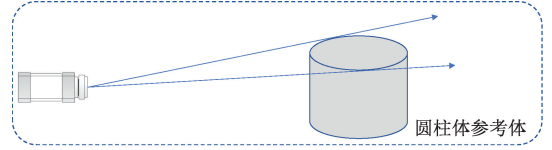
图 3 法向量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of normal vector

为了确定不同视角下的方向发射率,本文提出了基于参考体的方向发射率计算方法。本文定义参考体满足以下两个条件:1)参考体的材质与被测对象材质种类相同,且两者表面粗糙度相同。2)参考体的形状含有曲面,如圆柱体、半圆柱体等。具体步骤如下。

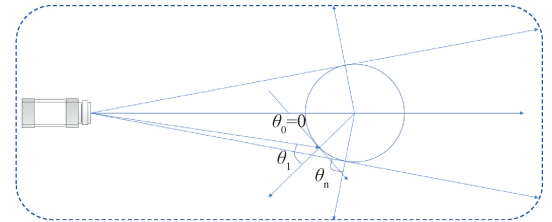
首先利用与被测对象相同种类相同表面粗糙度的材料制成如图 4(a) 所示的圆柱体或者半圆柱体作为参考体;其次在参考体上贴上特征标签,利用激光扫描仪对参考体进行三维重建;然后使参考体的表面温度 T_{ref} 保持恒定,利用红外热像仪近距离正对该参考体,以获取参考体的表面温度分布,如图 4(b) 所示;根据红外热图像中的特征标签位置和参考体三维模型中特征标签的空间位置信息,采用 PnP 算法,获取红外热像仪的外参数,进而可以获取红外热像仪光心 O 和被测对象表面 P 点的向量 \mathbf{PO} ;再基于参考体三维模型顶点的法向量,计算参考体的三维点云中不同顶点处的视角 θ ,并从红外热图像中手动选择不同视角 θ 下像素点对应的温度值;然后,根据

某个视角 θ 下像素点对应的实测温度 T_θ 计算得到的红外检测信号 $U_{D,\theta}$,结合参考体的真实温度 T_{ref} ,基于式(8) 计算出不同视角 θ 对应的方向发射率 $\varepsilon(\theta)$;最后根据得到的多组不同视角 θ 下的 $\varepsilon(\theta)$ 数据,采用多项式拟合的方式获取方向发射率 ε 与视角 θ 间的函数关系。



(a) 圆柱体参考体示意

(a) Schematic diagram of cylinder reference body



(b) 方向发射率实验示意

(b) Schematic diagram of the directional emissivity experiment

图 4 基于参考体的方向发射率计算

Fig. 4 Calculation of directional emissivity based on reference body

$$\varepsilon = f(\theta) \quad (13)$$

综上所述,结合温度补偿模型(式(10))和方向发射率随视角的变化规律(式(13))来计算准确的被测对象表面温度分布。

2 红外测温补偿实现步骤

通过上述分析,针对方向发射率变化的红外测温补偿实现过程如图 5 所示。概括为以下步骤:

- 1) 利用红外热像仪获取被测对象的红外热图像;
- 2) 使用激光扫描仪获取被测对象的三维点云及其法向量;
- 3) 计算被测对象三维顶点的视角;
- 4) 根据被测对象三维顶点的视角和方向发射率确定方法,计算被测对象不同三维顶点对应的方向发射率;
- 5) 利用针对方向发射率变化的红外测温补偿模型对红外测温结果进行补偿,实现被测对象表面温度分布的准确获取。

3 实验验证

为了说明所提红外测补偿方法的有效性,本文以圆柱体的金属水杯为实验对象,利用所提三维热成像系统

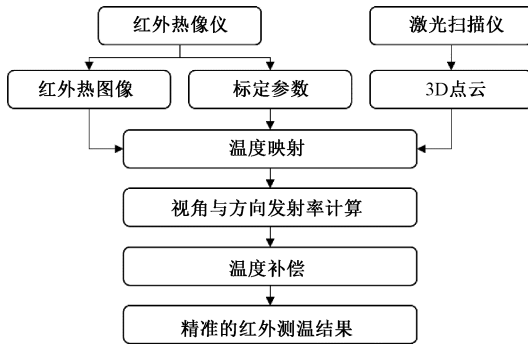


图5 红外测温补偿方法实现图

Fig. 5 Implementation of the infrared temperature measurement compensation method

开展红外精确测温实验。图6分别显示了红外热像仪获取的金属水杯红外热图像和激光扫描仪获取的金属水杯三维点云。

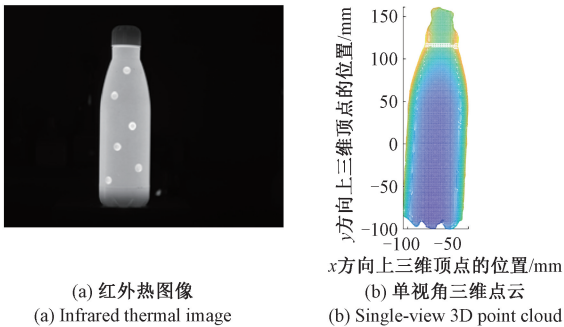


图6 金属水杯实验结果图

Fig. 6 Experiment results of metal water cup

受实验材料的限制,无法找到与金属水杯同材质的参考体,故本文先以某温度 T_1 下的该金属水杯为参考体,对其进行三维热成像,利用本文所提方向发射率计算方法获取其表面的方向发射率变化规律,然后再利用该方向发射率变化规律来对另一温度 T_2 下的金属水杯表面温度进行补偿。

图7显示了金属水杯表面补偿前后的红外测温结果。在图7(a)中,实质上在金属水杯中同一高度处的温度是相同的,但由于金属水杯表面方向发射率的变化,导致金属水杯中温度较低,两边温度较高,红外测温结果存在误差,无法准确地反应金属水杯表面的温度分布。图7(b)显示了对金属水杯表面温度进行补偿后的红外测温结果,从图中可以直观地看出,金属水杯同一高度处的伪彩色近似相同,即温度是相同的。这表明所提红外测温补偿方法有效降低了方向发射率变化造成的红外测温误差。

为了更加直观对比补偿前后的金属水杯表面温度的分布,本文手动选取了某一个高度处从金属水杯中间区域到金属水杯边缘的三维顶点,并记录这些三维顶点补

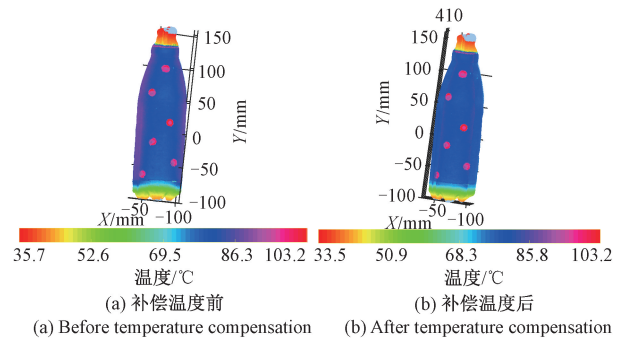


图7 金属水杯表面温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of a metal water cup

偿前后的温度变化,如图8所示。由于在一定视角范围内,金属表面的方向发射率可以近似认为是恒值^[20],因此,本文没有对视角在 $\pm 30^\circ$ 以内的三维顶点的温度值进行补偿,主要对视角在 $\pm 30^\circ$ 以外的三维顶点的温度值进行补偿。由图8可知,未经过补偿三维顶点的温度值随着方向发射率的变大而逐渐变大,测温误差也越来越大。相反,考虑方向发射率的变化,对三维顶点的温度值进行补偿后,方向发射率造成的红外测温误差显著减小,说明了所提红外测温补偿方法的有效性。

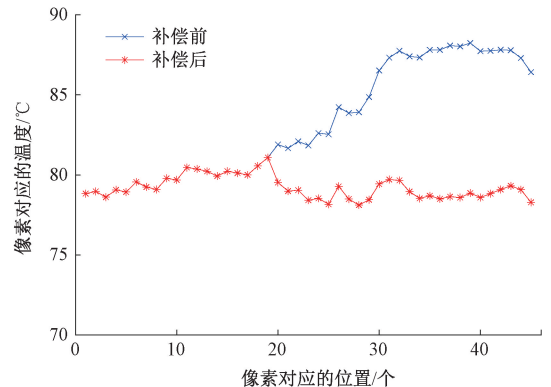


图8 金属水杯某位置处补偿前后的温度对比

Fig. 8 Comparison of temperature before and after compensation at a certain position of the metal water cup

为进一步定量说明所提红外测温补偿方法的有效性,本文利用了最大误差 $error_{max}$ 和标准差 σ 两个指标来评价补偿前后的红外测温结果。最大误差 $error_{max}$ 表征了在金属水杯某一高度处方向发射率引起的可能的最大红外测温误差,标准差 σ 表征了金属水杯某一高度处红外测温结果的离散程度。

$$error_{max} = T_{max} - T_{min} \quad (14)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i - \bar{T}} \quad (15)$$

式中: T_{max} 、 T_{min} 和 \bar{T} 分别表示金属水杯某一高度处中间

区域到边缘区域中最大温度、最小温度和平均温度, T_i 表示第 i 个温度值, n 表示金属水杯某一高度处中间区域到边缘区域中三维顶点的个数。

表2显示了补偿前后的评价指标。由表2可知,补偿前,由于方向发射率的变化,金属水杯某一高度处红外测温最大误差可达 9.64°C , 标准差有 3.57°C 。经过补偿后,金属水杯某一高度处红外测温最大误差降低为 2.97°C , 标准差降低为 0.71°C 。相比于补偿前,金属水杯某一高度处红外测温最大误差减小了3.24倍,标准差减小了5.01倍。

表2 补偿前后的评价指标对比

Table 2 Comparison of evaluation indicators before and after compensation

指标	补偿前	补偿后	提升程度
最大误差 $error_{\max}$	9.64	2.97	3.24
标准差 σ	3.57	0.71	5.01

4 结 论

针对被测物体表面方向发射率变化引起的红外测温误差问题,本文构建了基于红外测温原理的温度补偿模型,有效减小了方向发射率变化造成的红外测温误差。针对方向发射率不易确定的问题,利用红外热像仪和激光扫描仪构建了被测对象的三维热成像结果,进而提出了基于参考体的方向发射率校正方法,获取了被测对象表面的方向发射率随视角的变化规律。实验结果表明本文所提红外测温补偿方法可以有效地减小方向发射率造成的测温误差,从而获取准确的红外测温结果。

本文所提补偿方法需要利用三维热成像系统获取测温视角,根据视角与方向发射率之间的关系获取方向发射率,进而结合红外测温机理补偿模型对测温结果进行补偿。需要指出的是,红外测温误差补偿建模是一个复杂的问题,本文研究是针对方向发射率变化造成红外测温误差的初步探索。当无法采用参考体方法获取方向发射率或红外测温机理补偿模型难以构建时,需要考虑新的针对方向发射率变化的红外测温补偿方法。在后续研究中,将探索适用性更广的红外测温误差补偿模型,比如构建基于数据驱动的红外测温补偿模型,省去构建视角与方向发射率间的关系模型和红外测温机理补偿模型,直接构建方向发射率变化造成的红外测温误差与视角、被测对象实测温度间的定量关系。

参考文献

[1] PAN D, JIANG Z, CHEN Z, et al. Temperature measurement and compensation method of blast furnace

molten iron based on infrared computer vision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(10): 3576-3588.

[2] 杜启亮,莫鸿强,毛宗源,等. 硫化钡回转窑红外温度测量与分析[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 1492-1496.

DU Q L, MO H Q, MAO ZH Y, et al. Infrared temperature measurement and analysis in a barium sulphide rotary kiln [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 1492-1496.

[3] USAMENTIAGA R, VENEGAS P, GUEREDIAGA J, et al. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing[J]. Sensors, 2014, 14(7): 12305-12348.

[4] 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, 41(5): 10-18.

ZHANG ZH Q, WANG P, YU X D, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 10-18.

[5] QUAN Y M, XU H, KE Z Y. Research on some influence factors in high temperature measurement of metal with thermal infrared imager [J]. Physics Procedia, 2011, 19: 207-213.

[6] LITWA M. Influence of angle of view on temperature measurements using thermovision camera [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(10): 1552-1554.

[7] PAN D, JIANG Z, MALDAGUE X, et al. Research on the influence of multiple interference factors on infrared temperature measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10546-10555.

[8] BARRY T, FULLER G, HAYATLEH K, et al. Self-calibrating infrared thermometer for low-temperature measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(6): 2047-2052.

[9] 石东平,吴超,李孜军,等. 基于反射温度补偿及入射温度补偿的红外测温影响分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2321-2326.

SHI D P, WU CH, LI Z J, 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.

[10] 刘泽元,尚永红,林博颖,等. 红外测温设备的空间环境影响及防护研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 165-171.

LIU Z Y, SHANG Y H, LIN B Y, et al. Research on space environment influence and protection of infrared

- temperature measurement equipment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4):165-171.
- [11] 陈小惠,王卓培,王悠苒,等. 基于臀部红外测量的神经网络体温算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(9):1453-1458.
CHEN X H, WANG ZH P, WANG Y R, et al. Research on neural network body temperature algorithm based on hip infrared measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(9): 1453-1458.
- [12] PAN D, JIANG Z, GUI W, et al. Compensation method for the influence of dust in optical path on infrared temperature measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-11.
- [13] DAI S, YAN X, ZHANG T. Study on high-precision temperature measurement of infrared thermal imager[J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53(5): 396-398.
- [14] MUNIZ P R, CANI S P N, MAGALHAES R S. Influence of field of view of thermal imagers and angle of view on temperature measurements by infrared thermovision[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 729-733.
- [15] ZHANG Y, CHEN Y, FU X, et al. The research on the effect of atmospheric transmittance for the measuring accuracy of infrared thermal imager[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 375-381.
- [16] GUO Z, DAI S, LIU J, et al. Research on application of polynomial fitting technique in rotary kiln infrared temperature measurement system[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 79: 160-164.
- [17] DAI S, YU L, ZHANG X, et al. Research on surface temperature compensation of rotary kiln based on inverse exponential model[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 88: 128-132.
- [18] SHEN J, ZHANG Y, XING T. The study on the measurement accuracy of non-steady state temperature field under different emissivity using infrared thermal image[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 94: 207-213.
- [19] MULLER A O, KROLL A. Generating high fidelity 3D thermograms with a handheld real-time thermal imaging system [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 17(3): 774-783.
- [20] 杨立,杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
YANG L, YANG ZH, Temperature measurement principle and technology of infrared thermography [M].

Beijing: Science Press, 2015.

- [21] CARDONE G, IANIRO A, PASSARO A. Temperature maps measurements on 3D surfaces with infrared thermography. Experiments in fluids[J]. 2012, 52(2): 375-385.
- [22] CAMPIONE I, LUCCHI F, SANTOPUOLI N, et al. 3D thermal imaging system with decoupled acquisition for industrial and cultural heritage applications[J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 828.

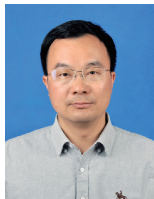
作者简介



潘冬, 2015 年于中南大学获得学士学位, 2021 年于中南大学获得博士学位, 现为中南大学讲师, 主要研究方向为红外热成像、视觉检测、深度学习、图像处理。

E-mail: pandong@csu.edu.cn

Pan Dong received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Central South University in 2015 and 2021, respectively. He is currently a lecturer at Central South University. His main research interests include infrared thermography, vision-based measurement, image processing, and deep learning.



蒋朝辉(通信作者), 2003 年于湘潭大学获得学士学位, 2006 年于中南大学获得硕士学位, 2011 年于中南大学获得博士学位, 现为中南大学教授, 主要研究方向为检测技术与自动化装备、图像处理、工业 VR、复杂工业过程的建模与优化控制。

E-mail: jzh0903@csu.edu.cn

Jiang Zhaozhui (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xiangtan University in 2003, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree from Central South University in 2006 and 2011, respectively. He is currently a professor at Central South University. His main research interests include detection technology and automatic equipment, image processing, industrial VR, modeling and optimal control of complex industrial processes.



桂卫华, 1976 年于中南大学获得学士学位, 1981 年于中南大学获得硕士学位, 现为中南大学教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为复杂工业过程检测、建模与控制。

E-mail: gwh@csu.edu.cn

Gui Weihua received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Central South University in 1976 and 1981, respectively. He is currently a professor at Central South University and Academician of the Chinese Academy of Engineering. His main research interests include measurement, modeling and control of complex industrial process.