

〈测量技术〉

非平表面的红外热像测温修正方法研究

付万超, 范春利, 杨立

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 利用红外热像仪测温需先设定被测表面的法向发射率, 该发射率通常为定值。而当热像仪处于被测点的天顶角大于 50° 的位置范围时, 由于被测点定向发射率的变化, 必造成这些点的测温误差。对于非平表面, 这样的点大量存在。因此, 必须对其测温结果进行修正。本文针对使用单目红外热像仪测量非平表面温度时由于各点定向发射率的变化引起的测量误差进行研究, 并依据物体表面定量发射率的变化规律, 给出了测量点的温度修正系数。同时, 通过点云三维建模, 利用热像仪的几何成像原理推导出红外热像图与实际被测表面中点与点的对应关系, 给出了通过红外热像仪测量非平表面的温度分布的误差修正方法。实验证明了该方法的有效性。

关键词: 红外无损检测; 红外热像仪; 测温误差; 温度修正; 非平表面

中图分类号: TK31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)02-0179-06

Compensation Method for Temperature Distribution Measured by Infrared Thermography for Non-flat Surfaces

FU Wanchao, FAN Chunli, YANG Li

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: When employing an infrared thermal imager to measure surface temperature, the emissivity of the surface to be measured should be set first and kept constant during the measurement process. However, when the infrared imager is placed in the range of more than 50° of the zenith angle of the points to be measured, the emissivities of the points in this angle will vary significantly; hence, temperature measurement errors will occur, especially for points on non-flat surfaces. In view of the measurement error caused by the variation of emissivity of different points in the measured non-flat surface when using a monocular infrared thermal imager, this paper provides a compensation factor based on the variation rules of the emissivity with the measuring angle. In addition, based on 3D modeling technology, the relationship between the positions of the points in the thermographic image and those in the actual surface is determined. The compensation method of the temperature measurements for a non-flat surface is presented. The feasibility of the method was verified through experiments.

Key words: thermographic non-destructive inspection, infrared imager, temperature measurement error, compensation method, non-flat surface

0 引言

在工业生产中, 及时掌握设备的工作状态是十分必要的。好多情况下, 物体表面温度可以间接地反映设备的工作状态, 因此开展依据物体表面温度对工业设备运行状态进行检测和监测的理论与方法研究具有重要的意义^[1-2]。

对于设备表面温度分布的测量, 最常用的设备为红外热像仪。通过红外热像仪进行测温, 一般要求正对测量表面。然而在狭小空间或由其他原因造成可达性较差的位置进行测量时, 如舰船的机舱, 常常无法满足红外热成像测温的要求, 因此就需要人们对特殊测量条件下所测得的温度分布进行修正。造成红外热像测温误差的因素很多, 相关的研究包括红外热像仪

收稿日期: 2020-07-29; 修订日期: 2020-08-20.

作者简介: 付万超 (1996-), 男, 硕士生, 主要从事红外无损检测和传热反问题等方面的研究。E-mail: 1009202412@qq.com.

通信作者: 范春利 (1978-), 男, 副教授, 主要从事红外无损检测和传热反问题等方面的研究。E-mail: chlfan@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51479203)。

的测温的影响因素分析及误差的计算^[1,3]、太阳、大气等环境的影响^[1,4-5]，周围高温物体的影响^[6-7]、测量距离及视角的影响^[8-9]、探测器温度的影响^[10]等。对于本文讨论的非平设备表面，尤其在热像仪处于被测点的天顶角的 50°范围之外时，发射率将发生明显的变化。因此，对于设为恒定表面发射率的热像仪，必将会产生显著的测温误差。因此，开展非平表面红外温度测量的修正研究具有重要的应用价值。

本文针对利用红外热像仪大角度测温或对非平表面进行测温因无法或部分无法处于表面各点定向发射率恒定的天顶角范围内时热像仪的测温误差进行研究，并基于物体表面定向发射率的变化规律，通过对所测表面进行 3D 建模，建立实际表面和热像图之间的坐标对应关系，提出热像仪所测温度分布的修正方法。方法通过实验进行验证。

1 红外测温及修正系数的计算

根据红外热像仪温度计算公式^[1]：

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T_i^n - (1-a) T_u^n - \frac{\varepsilon_a}{\tau_a} T_a^n \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中： ε 为物体表面发射率； τ_a 为大气的光谱透射率； T_i 为热像仪指示的辐射温度； ε_a 为大气辐射率； T_u 为环境温度。在 3~5 μm ， $n=9.2554$ ；在 8~12 μm ， $n=3.9889$ 。

由式(1)可知，温度测量值与被测物体的发射率 ε 密切相关。在测量复杂物体表面时，需在热像仪上将发射率设为一固定值，通常为该表面材料的法向发射率。天顶角是某个方向和天顶方向的夹角，通常记为 θ （见图 1）。本文中利用天顶角来描述热像仪测量物体表面中点的温度时，热像仪成像中心点相对于物体表面的位置关系。在一次测量时，热像仪所处的位置，对于非平表面上不同的点具有不同的天顶角 θ 。当角 θ 超出一定范围（如大于 50°）时，定向发射率的变化必然对红外测温的准确性产生影响。

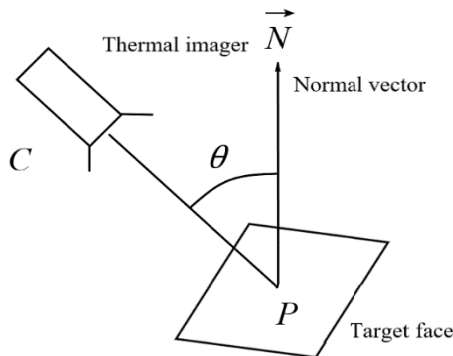


图 1 热像仪机位与其对应的天顶角

Fig.1 Position of thermal imager and corresponding zenith angle

根据菲涅尔定律^[1]，光谱方向反射率表示为：

$$\rho(\tilde{n}, \theta) = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{\tilde{n} \cos \theta - \cos \theta'}{\tilde{n} \cos \theta + \cos \theta'} \right|^2 + \left| \frac{\cos \theta - \tilde{n} \cos \theta'}{\cos \theta + \tilde{n} \cos \theta'} \right|^2 \right) \quad (2)$$

式中： $\tilde{n} = n(\lambda) - i \cdot k(\lambda)$ 表示材料的复折射系数。

根据 Snell 定律，折射角与入射角满足：

$$\sin \theta' = (1 / \tilde{n}) \theta \quad (3)$$

根据 Kirchoff 定律：

$$\varepsilon(\tilde{n}, \theta) = \alpha(\tilde{n}, \theta) = 1 - \rho(\tilde{n}, \theta) \quad (4)$$

据表 1^[11]中铝 (Al)、黄铜 (Brass)、聚乙烯 (PS)、聚苯乙烯 (PE) 4 种材料分别在 3~5 μm 与 8~12 μm 工作波段的复折射率可计算出其定向发射率随天顶角变化的理论值。

表 1 材料各波段复折射率

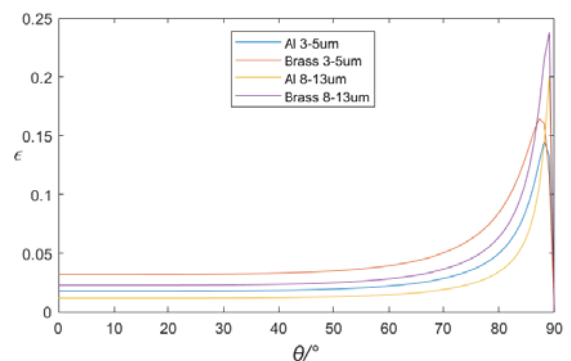
Table 1 Complex refractive indexes of the materials in each wave bands

	Al		Brass		PS	PE
band / μm	3-5	8-13	3-5	8-13	3-13	3-13
n	6.62	23.19	4.77	17.21	1.57	1.52
k	37.77	85.04	23.73	51.85	0	0

式(4)的计算结果如图 2 所示，可观察到金属与非导体定向发射率随天顶角的变化规律：各类材料定向发射率在被测点天顶角大于 50°附近开始出现明显的变化。

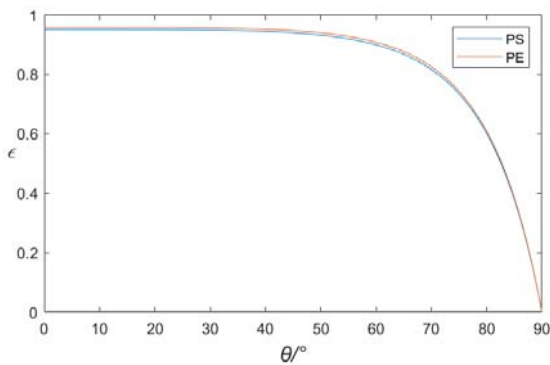
在工程测量中，需在测量前设定被测物体表面的发射率，通常设为其法向发射率 ε_{\perp} 。对于相对平整的表面，可使用 ε_{\perp} 代表所有点的发射率。当热像仪处于被测点的天顶角大于 50°的位置范围时，需采用该角度的定向发射率。对于不同角度的定向发射率 ε_{θ} ，根据(1)式可知实际温度 T_0 与测量温度 T_1 的关系为：

$$T_1 = \left\{ \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\theta}} \right\}^{\frac{1}{n}} T_0 \quad (5)$$



(a) 金属材料发射率随天顶角变化

(a) Variation of emissivity of metallic materials with zenith angle



(b) 非金属材料发射率随天顶角变化

(b) Variation of emissivity of nonmetallic materials with zenith angle

图 2 定向发射率随天顶角的变化

Fig.2 Variation of direction emissivity with zenith angle

定义修正系数为:

$$c(\theta) = \left\{ \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\theta}} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

则可得修正系数曲线如图 3 所示。

由图 3 观察得出, 对于金属表面温度测量结果的修正系数在天顶角大于 50°时减小, 在 90°附近上升迅速, 而非导体在天顶角大于 70°时迅速增加, 最大时测温误差可达 50%。因此, 需要对红外热像图中不同位置的温度值依据其对应实际点的修正系数进行修正。

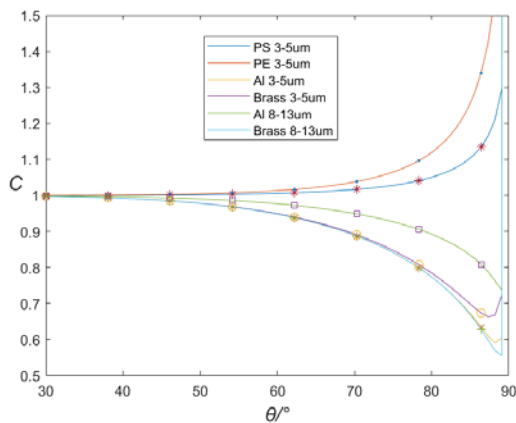


图 3 温度修正系数随天顶角的变化

Fig.3 Temperature correction factors vs. zenith angles

2 被测表面各点天顶角的计算

如前所述, 要计算被测表面各个点的修正系数, 必须首先计算各个点红外测温时热像仪所处的天顶角 θ 。

2.1 坐标与法向量的获取

利用 3D 建模或 3D 扫描技术可获取被测物体的

空间结构, 存储格式为 .stl 文件。将所得 .stl 文件使用 Meshlab 软件进行网格划分处理后可获得该被测物体的点云数据, 存储为 .xyz 文件。 .xyz 文件为一组六维向量, 前三维是点云中各点世界坐标系下坐标 $\vec{p}_w = [x_w, y_w, z_w]^T$, 后三维是该点的法向量坐标 $\vec{N} = [n_x, n_y, n_z]^T$ 。

以一锅炉为例, 绘制出其点云坐标和法向量如图 4 所示。

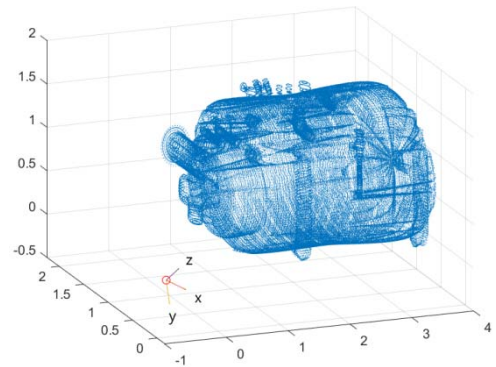


图 4 某锅炉点云坐标与法向量示例

Fig.4 Point cloud coordinates and normal vectors

本文将建模过程中的模型原点作为世界坐标系原点。可知热像仪机位中心坐标 $I = [x_c, y_c, z_c]^T$ 。

2.2 天顶角的计算

由热像仪机位中心坐标与空间坐标可得测量方

向向量: $\vec{p}_w I = [x_c - x_w, y_c - y_w, z_c - z_w]^T$

则可计算天顶角为:

$$\theta(p_w, I) = \langle \vec{N}, \vec{p}_w I \rangle = \arccos \left(\frac{\vec{N} \cdot \vec{p}_w I}{|\vec{N}| \cdot |\vec{p}_w I|} \right) \quad (7)$$

由空间几何关系可知, 对于天顶角小于 90°的被测点, 由于透视关系无法在热像仪上成像, 因此可得可视部分如图 5 所示。

其中坐标为 (-0.75, 0.12, 0.1) 的点为红外热像仪中心所在点, 黄色部分为锅炉表面在该位置关系下热像仪的可视点, 蓝色为不可视点。

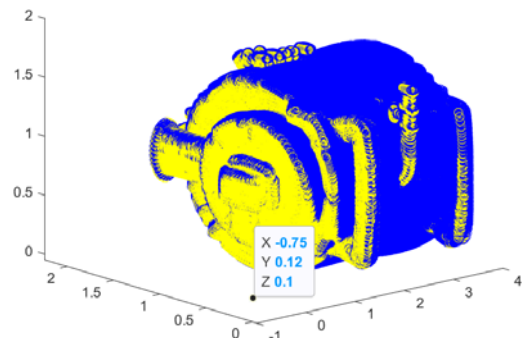


图 5 锅炉的红外热像仪可视点

Fig.5 Visible points of boiler for the infrared imager

2.3 温度修正系数的分布

由该位置关系可计算得出各点对应天顶角 θ 。由于实际工程应用中,通常在金属表面填涂一层非导电涂料,且非导体在法向发射率相较于导体更大,理论的光谱定向发射率与实际相差不大,因此以 $8\sim 13\mu\text{m}$ 的PS(Poly styrene)材料作为被测物体材料。在图4的位置关系下,计算得出该锅炉的修正系数 c 的频率分布直方图如图6所示。经计算可得,该位置关系下修正系数大于1.2的点占比44.1%。由此可见,对实际非平面测温时的定向发射率进行修正是非常必要的。

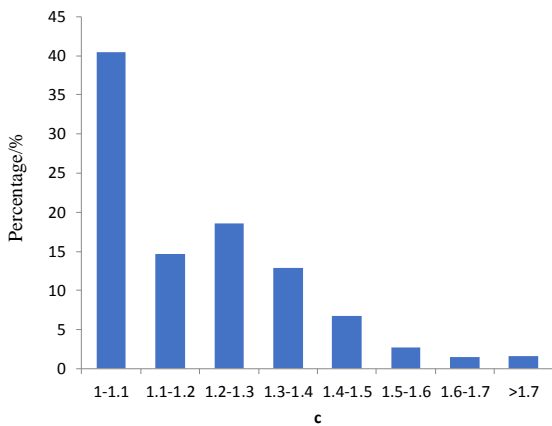


图6 不同温度修正系数对应的被测点所占总被测点的比例
Fig.6 Percentage of points with different temperature correction coefficients

3 被测点在图像的映射

天顶角与成像点的实际位置和其法向量密切相关。因此,针对红外热像仪所测温度的修正需明确各成像点在世界坐标中的实际位置。

世界坐标系下被测点 p_w 经红外热像仪投影至平面像素点 $p_p=[u,v]^T$,在成像过程中经过两次坐标变换,分别是由世界坐标系到热像仪坐标系的变换和由热像仪坐标系到像素坐标系的变换^[12],两个变换分别通过外参矩阵和内参矩阵来实现。

3.1 外参矩阵的获取

世界坐标 p_w 到热像仪坐标 p_i 的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} p_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_i & I \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} R_i^T & -R_i^T I \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

为热像仪的外参矩阵, R_i 为热像仪的基坐标在世界坐标系的坐标,描述热像仪在世界坐标系中的姿态, I

为热像仪中心在世界坐标系中的位置。

获取热像仪的外参矩阵需确定热像仪姿态,热像仪在成像过程中一般固定角度。假设热像仪在实际测量中热像仪 x 轴始终与水平面平行,仅存在俯角 γ 与转角 β 。则可知当热像仪对准被测物体中心 $\overline{p_w}=[\overline{x_w}, \overline{y_w}, \overline{z_w}]^T$ 时,热像仪中心指向被测点中心向量 $\overrightarrow{Cp_w}=[\overline{x_w}-x_c, \overline{y_w}-y_c, \overline{z_w}-z_c]^T$ 为热像仪坐标 z 轴方向,热像仪坐标系 x 轴与水平面平行, y 轴方向垂直于 x 轴和 z 轴。由数学关系可得3个方向的标准基为:

$$\begin{aligned} e_1 &= [\overline{y_w}-y_c, x_c-\overline{x_w}, 0]^T / \left((\overline{x_w}-x_c)^2 + (\overline{y_w}-y_c)^2 \right) \\ e_2 &= e_3 \times e_1 / |e_1||e_3| \\ e_3 &= [\overline{x_w}-x_c, \overline{y_w}-y_c, \overline{z_w}-z_c]^T / \left((\overline{x_w}-x_c)^2 + (\overline{y_w}-y_c)^2 + (\overline{z_w}-z_c)^2 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

计算可得 $R_i=[e_1, e_2, e_3]$ 为热像仪在世界坐标系旋转到当前姿态的旋转矩阵。

当热像仪角度变化时,可根据热像仪的俯角与转角求得热像仪坐标系 z 轴与水平面的交点:

$$p_0 = \left[(x_c + z_c / \tan \gamma) \sin \beta, (y_c + z_c / \tan \gamma) \cos \beta, 0 \right]^T \quad (11)$$

将上述计算过程中被测点中心 $\overline{p_w}$ 替换为 p_0 即可

根据热像仪实际姿态确定外参矩阵。

3.2 内参矩阵的获取

在世界坐标转换为热像仪坐标后,需将热像仪坐标转换为像素坐标,完成三维到二维的转变。

热像仪坐标 p_i 到像素坐标 p_p 的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_{p_c}} \begin{bmatrix} k_x & 0 & c_x \\ 0 & k_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} p_c \quad (12)$$

式中: $K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & c_x \\ 0 & k_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为热像仪的内参矩阵, $\frac{1}{z_{p_c}}$ 为

尺度因子,描述成像位置与热像仪中心的距离。

内参矩阵与热像仪的型号和图像的分辨率有关, k_x, k_y 为热像仪 x 与 y 方向的像素焦距, c_x, c_y 为图片主点偏移,内参矩阵均以像素为单位。

f_x, f_y 为热像仪 x 与 y 方向的毫米焦距,对于毫米焦距和像素焦距的转换关系有:

$$\begin{aligned} f_x &= k_u * dx \\ f_y &= k_v * dy \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} dx &= (1/ccd_size * 24.5 * \\ &\quad image_x / image_y) / image_x \\ dy &= (1/ccd_size * 24.5 * \\ &\quad image_x / image_y) / image_y \end{aligned}$$

式中: ccd_size 是热像仪厂商给出的 CCD 尺寸, 以英寸为单位; $image_x$ 、 $image_y$ 是图像 x 、 y 方向的像素数, 与成像的分辨率有关。

3.3 热像仪标定

在工程应用中, 外参矩阵主要通过机位的计算得出, 内参矩阵经热像仪标定得出。

对于热像仪标定, 一般使用张氏标定法^[13]。通过 Matlab 软件自带的热像仪标定程序 `camera calibrator` 可对单目热像仪进行标定。可见光相机标定需打印棋盘格, 对于红外热像仪, 将棋盘格用金属板代替。黑色部分使用隔热胶带, 白色部分使用金属板或锡纸。

在程序中输入标定板在不同角度下的红外热像图, 可得到热像仪中心与标定板相对位置和热像仪内参、外参、图片尺寸等参数。本文主要使用标定得到的热像仪内参矩阵 K 。

4 温度修正计算流程

4.1 温度修正系数矩阵

总体的温度修正计算流程如图 7 所示。

据式(7)计算出天顶角, 查得该天顶角下的发射率, 然后计算式(6)得到世界坐标系下各测温点的修正系数 $c(p_w)$ 。经热像仪成像后, 测温点由世界坐标 p_w 映射到成像平面坐标 $p_p=[u,v]^T$ 。 p_w 到 p_p 的转换关系由 3.3 节标定的热像仪矩阵计算得出。经上述转换关系可得测温点在二维平面坐标对应的修正系数 $c(p_p)$ 。

热像仪拍摄的温度图像将温度以矩阵的形式存储, 因此, 应当将 p_p 从离散的点云转换为与热像图格式相同的 p_{ij} , 其中, p_{ij} 代表像素块 (i,j) 的坐标。

对于修正系数在像素块范围内梯度较小的点, 该

像素块的修正系数取像素块内的平均值。对在热像图上像素位置为 (i,j) 的点, 该像素的修正系数为:

$$c_{i,j}(p_p) = \frac{\sum_{k=1}^m c_0(u,v)}{m}, \{u \in [i, i+1), v \in [j, j+1)\} \quad (14)$$

当像素内修正系数梯度变化较大的, 可采用该像素内修正系数最大值附近点取平均值的方法, 在此像素块内凸显该形状非光滑点。

$$c_{i,j}(p_p) = \max(c_0(u,v)), \{u \in [i, i+1), v \in [j, j+1)\}$$

4.2 成像温度修正

对于红外热像仪, 其所测温度矩阵为 $T_0(p_p)$ 。修正后的温度矩阵为所测温度矩阵与温度修正系数矩阵做基本积 (哈达玛积):

$$T_{i,j}(p_p) = T_{0i,j}(p_p) * c_{i,j}(p_p) \quad (15)$$

所得温度 $T(p_p)$ 即修正后的温度。

5 实验验证

本文通过一个热水桶表面的温度测量实验来验证该算法有效性。首先使用 Solidworks 软件进行几何建模, 获得被测物体几何信息, 经 Meshlab 软件求得热像仪可视表面的点云及各点处的法向量, 再经 Matlab 计算出各点温度的修正系数以及各点对应的热像图中的坐标, 最后将红外热像仪直接测得的温度分布信息导入 Matlab 进行修正得到水桶表面的修正后的温度。

5.1 红外测温与热像仪标定

本文选用 Fluke Ti400 型号热像仪进行测温, 测温表面为一聚乙烯塑料桶侧面, 塑料桶底部外径为 18 cm, 顶部外径为 20.5 cm, 高为 20 cm。塑料桶中为热水, 热像仪在世界坐标系中的坐标为 $C=[-0.75, 0.12, 0.10]^T$, 热像仪正对塑料桶中心, 位置关系如图 8 所示。测得塑料桶外表面可视部分的红外热像图见图 9。

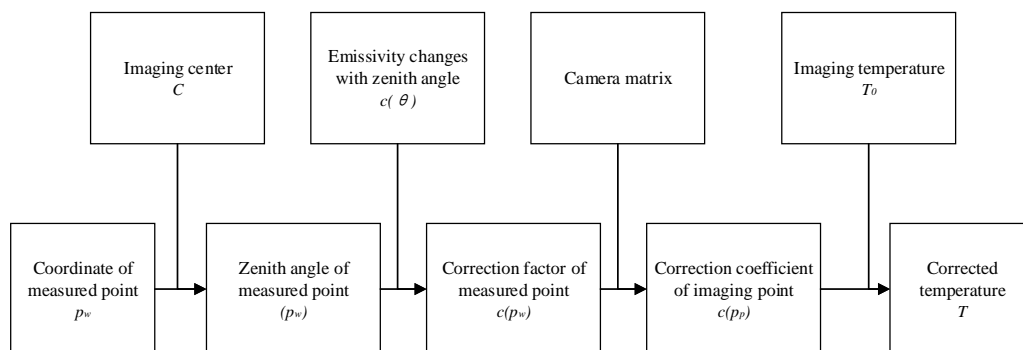


图 7 温度修正流程图

Fig.7 Flow chart of temperature compensation



图8 热像仪机位

Fig.8 Position of thermal imager

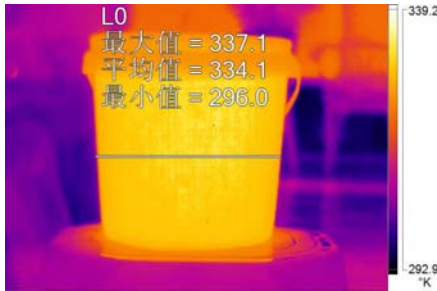


图9 红外热像图与温度截线

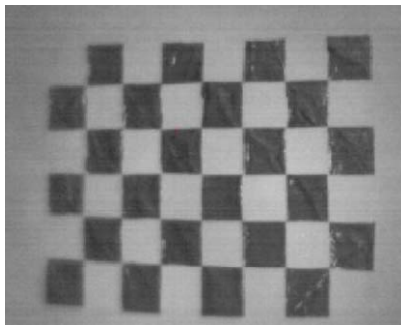
Fig.9 Infrared thermal image and temperature crossing line

使用热像仪拍摄红外标定板(如图10所示),获取标定板的红外热像图,将热像图输入标定程序,获得热像仪内参矩阵 K 。



(a) 可见光相机拍摄的标定板

(a) Calibrating board for camera of visible light



(b) 红外热像仪拍摄的标定板

(b) Calibrating board for infrared thermal imager

图10 红外热像仪的标定

Fig.10 Calibration of infrared thermal imager

5.2 测温结果的修正

通过Solidworks软件建模并将得到的水桶表面的云数据导入Matlab软件中,可得到水桶表面与热像

仪在空间中的位置关系,如图11所示(黄色点为被测表面的可视点,蓝色为被测表面的非可视点)。本实验中,略去了接近桶口的外径较大的部分。

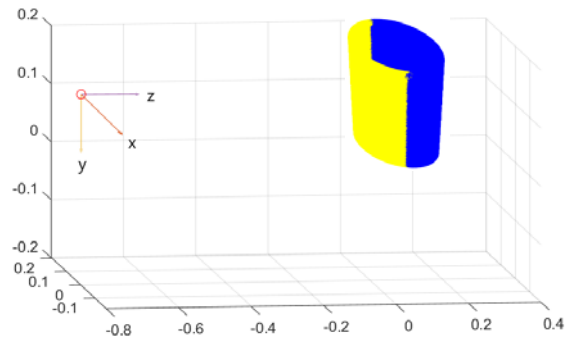


图11 热像仪与被测表面的位置关系

Fig.11 Positions of thermal imager and measured surface

依据热像仪与可视点的空间位置关系,据式(7)可计算得各可视点的天顶角,据图2可得不同天顶角时,所对应的发射率。然后据式(6)算得每个可视点的修正系数。如4.1节所述,对空间中可视点进行热像仪矩阵的变换,映射至平面可得出热像图中各点对应的修正系数,见图12。进而依据式(15)得到热像图中各点修正后的温度分布。

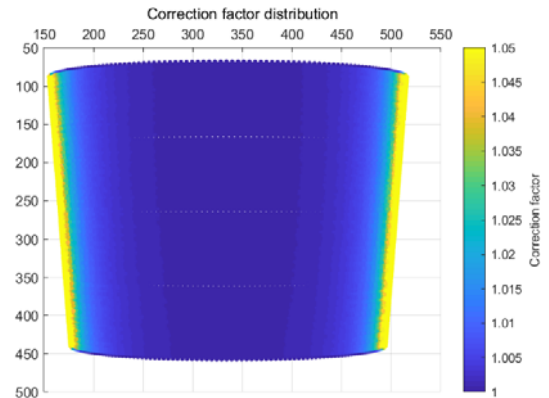


图12 修正系数分布

Fig.12 Correct factors distribution

为了更好地显示本文方法对红外热像仪所测得的温度分布,本节在所研究的可视表面高度方向的中心,取与图9中相同位置的截线进行展示,修正系数如图13所示。将所得修正系数与成像截线温度相乘得到修正后的截线温度,修正前后温度的对比如图14所示。

由图14可见,修正前最大误差近 40°C ,真实温度为 335°C ,相对误差约为12.4%;修正后,集中在两侧大角度测量时的误差不超过 5.0°C ,相对误差小于1.5%。从此可见该方法的有效性。值得说明的是图13中修正系数分布曲线并不完全对称,主要原因是该图的横坐标为非常微小的像素点,研究过程中像素点的选取没有完全对称所致。更多的平行截线结果

均表明,该修正方法较好地消除了非平表面在红外热像测温时部分因为测量角度过大而引起的发射率变化所造成的误差。

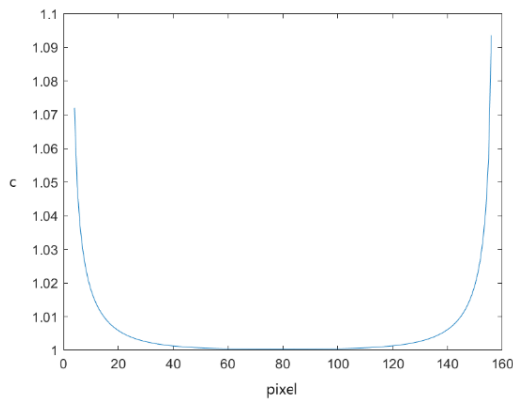


图13 截线上各点的修正系数

Fig.13 Correction factors of points in cross-line

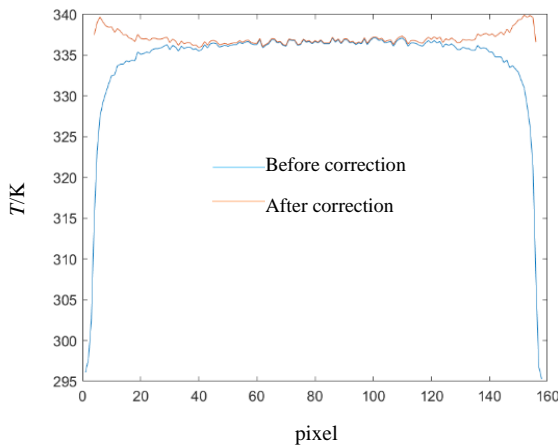


图14 截线上温度分布修正前和修正后的对比

Fig.14 Comparison of temperature distributions before and after correction of points in the cross-line

6 结论

针对使用红外热像仪测量非平表面温度时不同被测量点的定向发射率的变化对测温结果的影响,本文依据物体表面定量发射率的变化规律,给出了各个测量点的修正系数。同时,通过点云三维建模,利用热像仪通用几何成像原理推导出红外热像图像素与实际物体的被测表面之间各个测量点的对应关系,给出了红外热像测温过程中非平表面上的大天顶角被测点的温度测量结果的误差修正方法。实验证明了该方法的有效性。

参考文献:

[1] 杨立,杨楨. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社,2016.
YANG Li, YANG Zhen. *Theory and Technology of Temperature Measurement by Infrared Thermography*[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2016.
[2] 范春利. 几何形状导热反问题方法与应用[M]. 北京: 科学出版社,

2015.
FAN Chunli. *Geometric Inverse Heat Conduction Problems: Methods and Applications*[M]. Beijing: Science Press, 2015.
[3] 廖盼盼, 张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 173-177.
LIAO Panpan, ZHANG Jiamin. Research on influence factors for measuring and method of correction in infrared thermometer[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(2): 173-177.
[4] 刘慧开, 杨立. 太阳辐射对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 34-37.
LIU Huikai, YANG Li. Effect of radiation of the sun on infrared temperature measurement[J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(1): 34-37.
[5] 吕游, 杨波, 魏仲慧, 等. 大气与环境影响分析的红外比色测温方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2321.
LV You, YANG Bo, WEI Zhonghui, et al. Middle infrared colorimetric temperature measurement method considered influence of atmosphere and ambient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2321.
[6] 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): 0204006.
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): 0204006.
[7] 张健, 杨立, 刘慧开. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2005, 27(5): 419-422.
ZHANG Jian, YANG Li, LIU Huikai. Effect of environmental object on infrared temperature measurement[J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(5): 419-422.
[8] 周志成, 魏旭, 谢天喜, 等. 观测距离及视角对红外热辐射检测的影响研究[J]. 红外技术, 2017, 39(1): 86-90.
ZHOU Zhicheng, WEI Xu, XIE Tianxi, et al. Influence of observation distance and angle of view on the detection accuracy of infrared thermal radiation[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(1): 86-90.
[9] 杜玉玺, 胡振琪, 葛远航, 等. 距离对不同强度热源红外测温影响及补偿[J]. 红外技术, 2019, 41(10): 976-981.
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(10): 976-981.
[10] 范春利, 杨立, 华顺芳. 热探测器温度对红外热像仪测温的影响[J]. 红外技术, 2002, 24(5): 22-24.
FAN Chunli, YANG Li, HUA Shunfang. Effect of temperature of thermal detector on temperature measurement of uncooled infrared thermography[J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(5): 22-24.
[11] Mikhail Polyanskiy. Refractiveindex.info database [DB/OL]. [2020-04-01] <https://refractiveindex.info/2008-2020>.
[12] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
MA S, ZHANG Z. *Computer Vision Algorithms and the Theoretical Calculation Based* [M]. Beijing: Science Press, 1998.
[13] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.