

文章编号: 1672-8785(2015)05-0025-05

基于加权最小二乘的红外热像仪的标定

宋晓梅 周康康*

(沈阳大学机械工程学院, 辽宁沈阳 110044)

摘 要: 目前, 人们在对红外热像仪进行辐射标定时, 普遍采用精度不太理想的最小二乘法。为减少热像仪的系统随机误差、环境波动和黑体温度不稳定等因素对标定结果的影响, 提高标定模型的精度, 建立了基于加权最小二乘的红外热像仪标定模型, 并分别基于加权最小二乘法与最小二乘法进行了标定实验和辐射测量实验。实验结果表明, 基于加权最小二乘的标定模型的拟合精度更高, 其在辐射测量实验中的平均测量精度比基于最小二乘的平均测量精度提高了 2.3%。基于加权最小二乘的红外热像仪的标定具有较强的实用价值和一定的借鉴意义。

关键词: 红外热像仪标定; 大面源黑体; 加权最小二乘; 辐射测量

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.05.006

Calibration of Infrared Thermal Cameras Based on Weighted Least Square

SONG Xiao-mei, ZHOU Kang-kang

(College of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: Although the least square method is widely used in the calibration of infrared thermal cameras at present, its accuracy is not ideal. To reduce the influences of the system random error, environmental fluctuation and unstable blackbody temperature of a thermal camera on the calibration result, a calibration model for infrared thermal cameras based on a weighted least square method is established. Both calibration experiments and radiation measurement experiments are carried out by the weighted least square method and the least square method respectively. The experimental results show that the calibration model based on the weighted least square has a higher fitting accuracy and its mean measurement accuracy in radiation measurement experiments is improved by 2.3% compared with that of the least square method. The calibration based on the weighted least square method is of practical value and of a certain referential significance.

Key words: calibration of infrared thermal camera; large extended area blackbody; weighted least square; radiation measurement

收稿日期: 2015-04-14

基金项目: 中航创新基金(cxy2012SH18); 沈阳市科技创新团队(src201204)

作者简介: 宋晓梅(1969-), 女, 辽宁辽中人, 副教授, 硕士, 主要从事数控设备及实验设备的研究。

E-mail: 690500851@qq.com

* 通讯作者: 周康康(1988-), 男, 山东济宁人, 硕士, 主要研究方向为红外辐射测量。

E-mail: zk9708@163.com

0 引言

作为红外热像仪测温的关键技术, 辐射标定对热像仪的测温精度影响很大^[1,2]。随着热像仪的不断使用, 内部时间漂移、电路老化等因素会使热像仪内部的红外辐射响应发生改变。因此, 热像仪使用一段时间后, 需要重新对其进行辐射标定。

红外热像仪的辐射标定方法主要有查找表法和拟合曲线法^[3]。目前, 拟合曲线法的使用范围更广泛。拟合曲线法普遍采用最小二乘法和BP神经网络来处理标定数据^[4-7], 但基于最小二乘的热像仪标定并没有充分考虑热像仪系统的随机误差、实验室环境波动和黑体温度不稳定等因素对标定结果的影响。为了尽可能地减少这些影响, 本文引入了基于加权最小二乘的红外热像仪辐射标定方法。

在红外热像仪的辐射标定中, 通常先以标准面源黑体作为已知的目标源^[8]; 然后以某一梯度对标准面源黑体的温度进行设置, 并对不同温度的标准面源黑体进行近距离辐射测量; 再计算不同黑体温度所对应的辐射亮度, 得到关于面源黑体的辐射亮度和相应的红外热像仪数字输出值(如热图像灰度)的一组数据; 最后通过拟合曲线法得到红外热像仪的响应系数和系统偏置。

1 红外热像仪测量系统

如图1^[9]所示, 热像仪光学镜头接收到的红外能量主要包括三部分: 目标辐射、目标反射环境的辐射和大气辐射。其中目标辐射和目标反射环境的辐射经过大气传输后均会衰减, 分别记为 $\varepsilon\tau W_{obj}$ 、 $\tau(1-\varepsilon)W_{sur}$, 大气辐射部分记为 $(1-\tau)W_{atm}$ 。系统接收到的总能量为

$$W(\lambda, T) = \varepsilon\tau W_{obj} + \tau(1-\varepsilon)W_{sur} + (1-\tau)W_{atm} \quad (1)$$

式中, $W(\lambda, T)$ 为系统接收到的总能量; λ 为波长, 单位为 μm ; T 为目标体的表面温度, 单位为 K; ε 为目标发射率, 其值小于 1, 与目标材质、表面质量和温度等因素有关; τ 为大气

透射率, 其值小于等于 1, 与辐射路径中的大气分子吸收、大气散射和雨雪等气象条件有关; W_{obj} 、 W_{sur} 、 W_{atm} 分别为目标辐射能、环境辐射能和大气辐射能。

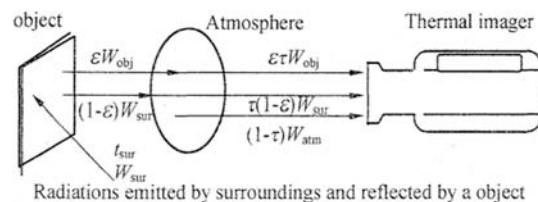


图1 红外热像仪测量示意图

被测物体的辐射亮度为

$$\begin{aligned} L_{\lambda} &= \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_o) + \rho_{\lambda} L_{b\lambda}(T_u) \\ &= \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_o) + (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, T_o 为被测物体的表面温度; ε_{λ} 为表面发射率; $L_{b\lambda}(T_o)$ 为物体在温度 T_o 时的辐射亮度; ρ_{λ} 为被测物体的表面反射率; T_u 为环境温度; $L_{b\lambda}(T_u)$ 为环境温度在 T_u 时的辐射亮度; α_{λ} 为被测物体的表面吸收率。

作用于热像仪的辐射照度为^[9,10]

$$\begin{aligned} E_{\lambda} &= A_o d^{-2} [\tau_{\alpha\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_o) \\ &\quad + \tau_{\alpha\lambda} (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u) + \varepsilon_{\alpha\lambda} L_{b\lambda}(T_a)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\tau_{\alpha\lambda}$ 为大气光谱透射率; $\varepsilon_{\alpha\lambda}$ 为大气发射率; A_o 为热像仪最小空间张角所对应的目标可视面积; d 为该目标到光学镜头的距离, 通常条件下 $A_o d^{-2}$ 为一个常值。

由于红外热像仪的工作波段通常为短波或长波, 故可认为目标表面发射率 ε_{λ} 、目标表面吸收率 α_{λ} 及大气光谱透射率 $\tau_{\alpha\lambda}$ 与 λ 无关。那么热像仪的响应电压为

$$V_s = K \{ \tau_a [\varepsilon f(T_o) + (1 - \alpha) f(T_u)] + \varepsilon_a f(T_a) \} \quad (4)$$

式中, $K = A_R A_o d^{-2}$; A_R 为热像仪透镜的面积; $f(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T) d\lambda$; R_{λ} 为探测器的响应率。

当被测物体表面满足灰体 ($\varepsilon = \alpha$), 大气发射率则为 $\varepsilon_a = \alpha_a = 1 - \tau_a$, 则:

$$V_s = K \{ \tau_a [\varepsilon f(T_o) + (1 - \varepsilon) f(T_u)] + (1 - \tau_a) f(T_a) \} \quad (5)$$

红外热像仪将获得的红外辐射能量信号转化为电信号, 再经过信号处理进入图像处理系统。图像处理系统使每一像素点的灰度与光敏元件接收到的红外辐射量一一对应, 经由热像仪内部复杂的算法处理即可在热图像上读出目标物体的辐射温度。因此, 热像仪的响应电压、热图像灰度与输入辐射量是一种映射关系。

在热像仪的辐射标定中, 人们通常对热像仪数字输出值 - 热图像灰度与输入辐射亮度进行标定。在本文的实例分析中, 我们则对热图像灰度与黑体辐射亮度进行辐射标定, 所用热像仪为美国 FLIR 公司生产的 A655SC 热像仪, 其响应光谱范围为 $7.5\ \mu\text{m} \sim 14\ \mu\text{m}$, 具有 640×480 红外图像分辨率和 16 位图像灰度级, 热灵敏度小于 $0.03\ ^\circ\text{C}$ 。

2 红外热像仪的辐射标定

2.1 数学标定模型

在对热像仪进行近距离满视场标定时, 由于辐射路程通常很短, 可认为此时的大气透射率 $\tau_a = 1$, 大气层辐射为零, 则黑体辐射亮度与热像仪输出灰度间的数学标定模型为

$$DN_{black} = KL_{black} + DN_o \quad (6)$$

式中, DN_{black} 为测量黑体时红外热像仪的输出灰度; K 为红外热像仪的红外辐射响应系数; L_{black} 为黑体的辐射亮度; DN_o 为红外热像仪内部辐射、背景辐射等造成的偏移量。

首先由普朗克定律求出黑体 n 个温度下的辐射亮度 $L_{black}^i, i \in [1, n]$, 并通过对黑体进行辐射测量得出相应的输出灰度 $DN_{black}^i, i \in [1, n]$ 。获得一组黑体辐射亮度和热像仪输出灰度数据后, 即可通过拟合曲线法对热像仪进行辐射标定, 得到热像仪的辐射响应系数 K 和偏移量 DN_o 。

2.2 黑体辐射亮度

将大面源黑体作为已知的标准辐射源, 其辐射亮度可由普朗克定律求出。对于不同的黑体温度 T , 其辐射亮度 L_{black} 也不同, 两者之间的关系为

$$L_{black} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1} d\lambda \quad (7)$$

式中, ε 为黑体发射率, 其值由生产厂家确定; C_1 和 C_2 分别为第一和第二辐射常

数, 取值为 $(3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$ 、 $(1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$; λ 为波长, 单位为 μm , 热像仪的工作波段为 $\lambda_1 \sim \lambda_2\ \mu\text{m}$ 。

2.3 红外热像仪输出灰度

当红外热像仪对面源黑体进行辐射测量时, 输入到红外热像仪光学镜头的是红外辐射能量, 输出可以是温度热图像和灰度热图像等。当以灰度作为系统的输出时, 灰度热图像又可以看作是一个二维数组。二维数组的尺寸取决于输出热图像的分辨率及热像仪的类型。若红外图像分辨率为 640×480 像素, 那么输出就是一个尺寸为 640×480 的二维矩阵。这样热像仪的输出就可以用热图像的灰度值来定量表示。若输出热图像像素的深度为 m 位, 则热图像像素点的取值范围为 $[0, 2^m - 1]$ 。

在实际的辐射测量中, 环境温度的变化、黑体温度的波动和热像仪的随机误差都会造成输出灰度偏离理论值。为了降低这些因素带来的测量误差, 在标定过程中要保证其测量环境恒定, 并且在计算输出灰度时, 需要在黑体温度稳定后连续采集若干帧热图像, 取其平均值, 并引入方差及权值, 通过灰度直方图来分析热图像的灰度特性。

3 标定实验

3.1 标定数据采集

在采集标定数据时, 选取 12.5 fps 录制帧频, 对每一个温度下的面源黑体连续采集约 250 帧热图像, 将固定计算区域的平均灰度作为当前帧的输出, 然后得出每一帧热图像的平均灰度 $DN_i (i = [1, 250])$, 并计算其方差 δ , 最终黑体输出灰度 DN_{black} 及权值 w 为

$$DN_{black} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DN_i, n \approx 250 \quad (8)$$

$$w = \frac{1}{\delta} \quad (9)$$

将黑体温度设定为 $303.15\ \text{K} \sim 413.15\ \text{K}$, 其中黑体发射率为 0.975, 温度分辨率为 $0.1\ ^\circ\text{C}$ 。具体的黑体温度、平均输出灰度、黑体亮度和权值见表 1。其中实验室环境温度为 $18\ ^\circ\text{C}$, 相对湿度为 51%。

表 1 标定实验数据

温度 (K)	303.15	312.15	323.15	333.15	343.15	353.15
亮度值 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	60.71	69.46	81.12	92.66	105.10	118.43
平均灰度	14665	16174	18087	19946	22296	24656
权值	0.0136	0.1176	0.1541	0.2242	0.2630	0.1538
温度 (K)	363.15	373.15	383.15	393.15	403.15	413.15
亮度值 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	132.65	147.77	163.77	180.64	198.37	216.96
平均灰度	27127	29752	32659	35582	38786	42264
权值	0.1236	0.1129	0.0537	0.0769	0.0568	0.0519

3.2 数据处理

对热像仪的输出灰度、黑体亮度、权值数据进行拟合时, 拟合模型如式 (6)。真实数据并不一定在拟合曲线上, 为了评价拟合曲线的拟合效果, 可以用和方差“SSE”、确定系数“R-square”和拟合标准差“RMSE”等评价指标来衡量。当和方差越小、确定系数越接近 1、剩余标准差越接近 0 时, 拟合效果越好, 拟合曲线的可信度越高, 也说明真实数据的规律性越强。

为了对比加权最小二乘法与最小二乘法的标定精度, 本文还就最小二乘法对热像仪进行了辐射标定, 其中将单帧热图像的输出灰度作为最终的输出结果。表 2 列出了分别基于两种方法的热像仪辐射标定结果及拟合效果评价指标, 拟合曲线、95% 置信度预测区和残差分布如图 2~ 图 5 所示。

表 2 拟合结果及拟合效果评价指标

拟合方式	响应系数	系统偏移	SSE	R-square	RMSE
加权最小二乘	176.7	3718	12800	0.9998	35.78
最小二乘	173.1	4398	503800	0.9994	224.5

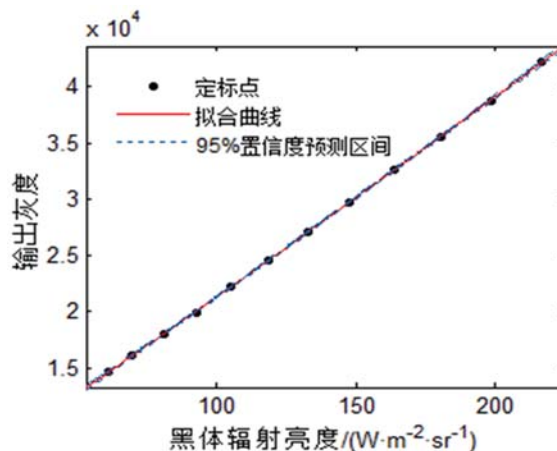


图 2 加权最小二乘法拟合曲线

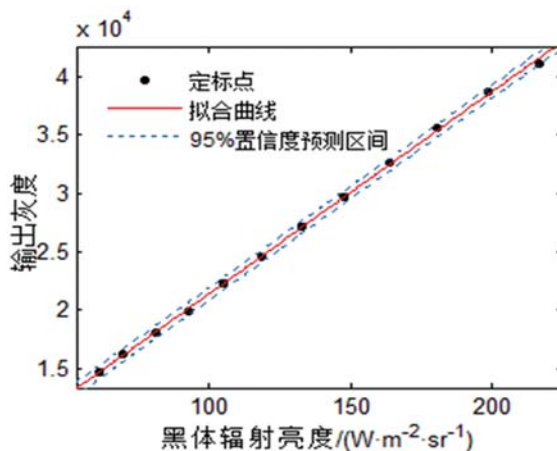


图 3 最小二乘法拟合曲线

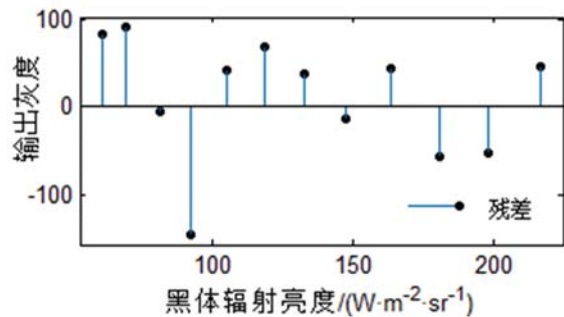


图 4 加权最小二乘法拟合残差分布

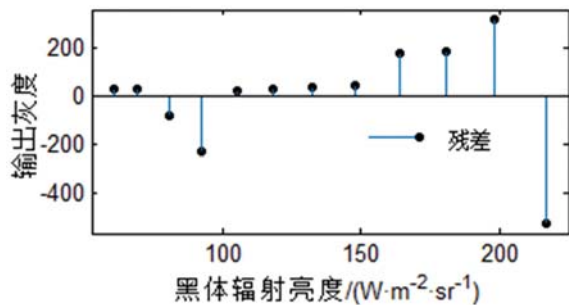


图 5 最小二乘法拟合残差分布

4 辐射测量实验

将标准面源黑体 (黑体发射率为 0.975, 温度

分辨率为 0.1 °C) 作为测量目标, 分别基于加权最小二乘法和最小二乘法标定模型对黑体进行辐射测量。其中将黑体温度分别设置为 40°C、60°C、…、120°C, 辐射路程均为 7 m, 环境温度为 18°C、相对湿度为 51%、测试地海拔高度为 0.445 km、大气透射率为 0.9955, 大气程辐射为 0.139 W·m⁻²·sr⁻¹, 测量模型为

$$DN = K(\tau_{\alpha}L + L_{path}) + DN_o \tag{10}$$

辐射测量实验结果见表 3。由表 2 和表 3 可得出以下结论:

- (1) 从标定模型拟合精度上看, 基于加权最小二乘法的拟合精度高于基于最小二乘法的拟合精度。前者的和方差、拟合标准差分别是后者的 2.54%、15.94%。
- (2) 从辐射测量实验结果上看, 基于加权最小二乘法的辐射测量精度明显大于基于最小二乘法的辐射测量精度。两者的平均测量误差分别为 3.2%、5.5%, 并且前者的测量精度比后者高出 2.3%。

表 3 辐射测量的实验结果

真实 温度 (°C)	目标输出灰度	加权最小二乘法			最小二乘法		
		反演亮度	反演温度	反演误差	反演亮度	反演温度	反演误差
		(W·m ⁻² ·sr ⁻¹)	(°C)	(%)	(W·m ⁻² ·sr ⁻¹)	(°C)	(%)
40	15987	69.61	39.15	2.1	67.11	36.65	8.4
60	19691	90.66	58.32	2.8	88.61	56.57	5.7
80	23972	115.00	77.49	3.1	113.45	76.34	4.6
100	28782	142.34	96.48	3.5	141.36	95.83	4.2
120	33886	171.36	114.56	4.5	170.98	114.33	4.7

5 结语

利用标准大面源黑体对热像仪进行了标定, 其中, 黑体辐射亮度作为热像仪的输入, 热图像灰度作为热像仪的输出。当黑体温度稳

定后, 将录制的约 250 帧热图像的灰度作为系统的输出, 引入权值, 大大降低了由于黑体稳定性、环境稳定性和系统随机误差等带来的测量误差。实验中, 分别基于加权最小二乘法与最小
(下转第 42 页)