

文章编号: 1672-8785(2014)09-0006-04

基于标准黑体的物体表面发射率计算方法研究

张 澎¹ 郭 玲² 王 琦² 关 威² 傅 莉²

(1. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035 ;

2. 沈阳航空航天大学自动化学院, 沈阳 110136)

摘 要: 红外测温仪器的精度和被测物体表面的发射率对测量物体红外辐射特性的准确性影响很大。为了提高物体表面发射率的计算精度, 先通过标准黑体对红外热像仪进行标定。然后, 利用标定好的红外热像仪测量温度, 计算出被测物体表面的发射率。将基于神经网络的红外热像仪标定方法应用到目标发射率的求解方法中, 有效地消除了热像仪的系统误差。测试装置简单, 测试结果准确。同时, 温度和发射率的精确测量为红外隐身材料的研制奠定了基础。

关键词: 红外热像仪; 仪器标定; 表面发射率; 辐射特性

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.09.002

Study of Calculation Method about Surface Emissivity of Objects Based on Standard Blackbody

ZHANG Peng¹, GUO Ling², WANG Qi², GUAN Wei², FU Li²

(1.Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110136;

2.School of Automation of Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136)

Abstract: The precision of infrared temperature measurement instruments and the surface emissivity of the tested object have a great influence on the accuracy of infrared radiation measurement. In order to improve the calculation accuracy of surface emissivity, an infrared thermal imager is calibrated through a standard blackbody. Then, the temperature is measured with the calibrated infrared thermal imager, and the surface emissivity of the object to be tested is calculated. By using the calibration method of the infrared thermal imager based on neural network to calculate the target emissivity, the system error of the infrared thermal imager is effectively eliminated. The measuring equipment is simple and its measurement result is accurate. At the same time, the precise measurement of the temperature and emissivity has laid the basis for the development of infrared stealth materials.

Key words: infrared thermal imager; instrument calibration; surface emissivity; radiation characteristics

0 引言

红外热像仪的标定技术是红外测温领域中

的关键技术之一。红外热像仪标定的任务是获得热像仪的数字化输出和热像仪接收到的辐射亮度(或目标温度)之间的关系^[1]。随着红外热

收稿日期: 2014-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61203352), 中航创新项目(cxy2012SH18)

作者简介: 张澎(1971-), 辽宁沈阳人, 博士在读, 研究员, 主要研究方向为目标探测与识别。

E-mail: 964179726@qq.com

成像系统的迅速发展和性能的不断提⾼, 各国在红外热成像系统辐射标定⽅⾯做了⼤量⼯作。1960 年, 英国国家物理实验室率先开展了⾼精度红外辐射标定技术的⼾究^[2]。⽬前, 英国、美国、荷兰和加拿⼤等国已经成功地建立了波长至 20 μm 的⾼精度红外辐射测量标准, 其中以美国国家标准技术研究院的水平为最⾼。在国内, 从 20 世纪 50 年代初开始, 中国科学院仪器馆(中科院长春光学精密机械与物理研究所前身)、中科院上海技术物理研究所和中科院安徽光学精密机械研究所等单位在辐射定标上就有突出贡献。标定通常采用拟合曲线法和查找表法^[3]两种⽅法。拟合曲线法通常采用最⼩二乘法和神经网络法。近年来, 神经网络的⼾究取得了很⼤的进展, 其⾼度并⾏的处理能⼒、良好的非线性影射能⼒和可⽤于优化计算的特点为实验数据曲线拟合提供了⼀种有效的⼯具。因此, 该⽅法具有很强的⾃适应和⾃学习功能, 其中 BP 网络是目前应⽤最广泛的一种网络模型^[4]。本⽂利⽤⾼精度恒温黑体(可⽅)作为标准, 通过⽤红外热像仪测量黑体温度, 采用 BP 神经网络算法和最⼩二乘法对红外热像仪的温度曲线进⾏定标, 获得了红外热像仪的输出温度与黑体温度的关系曲线。

物体表面的发射率不仅取决于物质的内在性质, 还取决于物质表面的物理状态和光滑程

度等。这些因素使得发射率的测量变得很复杂。表面发射率是目标红外辐射特性建模与仿真的重要参数, 所以如何确定被测表面的发射率已成为红外热像测温技术中的一个主要课题。虽然确定发射率有多种⽅法, 但在实际应⽤中, 每种测量⽅法各有优缺点。⽬前发射率测量实验⽅法包括量热法、能量法、反射率法和多波长法等^[5,6]。前人的⼯作主要是通过对热像仪进⾏标定得到响应系数, 计算对应的辐射特性和环境辐射对表面发射率测量的影响, 或者对参数的测量精度⾼时, 计算被测表面温度与环境温度相差不⼤时的物体表面发射率^[7,8]。本⽂基于热像仪标定的实验数据定标它的温度曲线, 不计算具体的标定系数。根据红外热像仪接收的有效辐射测温原理来计算物体表面的发射率, 布置背景屏蔽装置, 消除或降低由背景辐射变化引起的误差。该⽅法能提⾼发射率的计算精度, 简单可行, 在工程实际中容易实现。

1 基于标准黑体的红外热像仪标定

利⽤直接扩展源黑体进⾏标定, 标定距离为 0.1 m, 让辐射⾯完全充满红外热像仪的视场, 读取热像仪的温度均值。环境温度为 18 $^{\circ}\text{C}$, 对黑体的每⼀温度点进⾏了实验数据的采集, 见表 1。

表 1 热像仪的显示温度与黑体温度对应关系的实验数据

黑体温度 ($^{\circ}\text{C}$)	40	50	60	70	80	100	120	140
热像仪温度 ($^{\circ}\text{C}$)	40	50	60.4	70.6	81	100.2	120.4	140.7
黑体温度 ($^{\circ}\text{C}$)	160	180	200	220	240	260	280	300
热像仪温度 ($^{\circ}\text{C}$)	161.6	181.5	201.2	221.6	241.6	262.5	282.7	302.5

下⾯采用 BP 神经网络算法和最⼩二乘算法对表 1 的数据进⾏曲线拟合。由于实际⼯作中需要根据热像仪显示的温度均值计算出对应的黑体温度, 所以函数以热像仪的温度均值 x 为⾃变量, 黑体温度 y 为变量。

对于神经网络, 输⼊层有 1 个神经元, 中间隐含层有 5 个节点, 输出层有 1 个神经元。中间层的传递函数为正切 S 形函数 tansig; 输出层的

传递函数为线性函数 purelin。训练 1000 次后的拟合曲线如图 1 所示。

对于最⼩二乘算法, 已知多项式表达式为二次, 计算出拟合曲线的解析式。拟合曲线如图 2 所示。⽤⽅均根误差和⼤⼤误差率绝对值作为拟合效果的优劣参数, 当然这两个参数越⼩越好。分析结果见表 2。

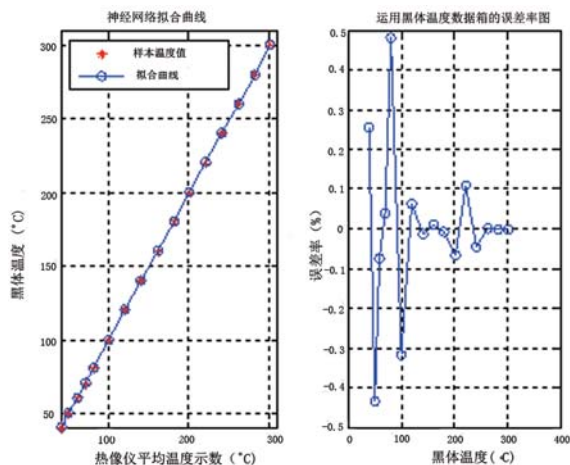


图 1 BP 神经网络的拟合曲线

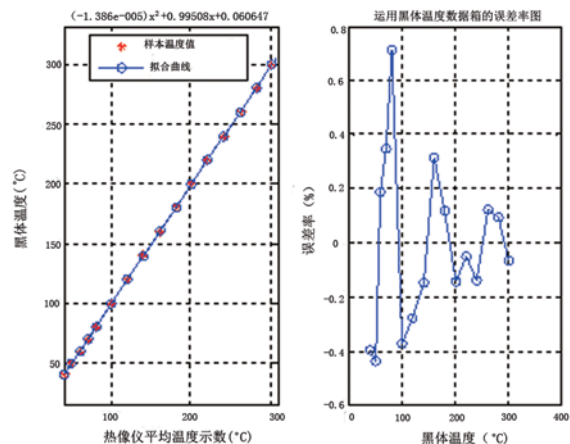


图 2 最小二乘法拟合曲线

表 2 分析结果

拟合算法	方均根误差	最大误差率绝对值
神经网络 BP 法	0.6348	0.4795
最小二乘法	1.2154	0.7140

比较神经网络 BP 算法和最小二乘法的拟合结果可知, 对于温度恒定的黑体, 最小二乘法的计算精度比较稳定, 可以得出具体的拟合表达式, 简单易行, 但测量精度略低, 只适用于测量精度要求不高的场合。而神经网络法的每次拟合结果都不同, 需要对网络进行多次训练和学习, 然后把训练效果比较好的保存下来, 因此神经网络法的计算精度较高, 工程实用价值更大一些。

2 热像仪标定的物体表面发射率计算方法

被测物体表面发射率对红外热像仪测量温度的准确性影响很大。为了提高物体表面发射率的计算精度, 通过标准黑体对红外热像仪进行标定, 然后根据由标定好的红外热像仪测量的温度计算出被测物体的表面发射率。这种方法简单实用。

2.1 红外热像仪测温原理的物体表面发射率计算

红外热像仪测温是根据接收被测物体表面发射的热辐射能量来确定其温度的。通常情况下, 被测物体是发射率小于 1 的灰体, 也就是说它的反射率不为零。因此在实际测温时, 红外探测器接收的辐射包括目标辐射和对周围环境辐射的反射。这些辐射经大气衰减和辐射后到达探测器。热像仪测温的通用基本公式为^[9]

$$V_s = K \{ \tau_\theta [\varepsilon f(T_{obj}) + (1 - \alpha) f(T_{refl})] + \varepsilon_\theta f(T_{atm}) \} \quad (1)$$

式中, V_s 为热像仪的信号电压, K 为常数, τ_θ 为大气透射率, ε 为物体表面发射率, α 为物体表面吸收率, ε_θ 为大气发射率 $\varepsilon_\theta = 1 - \tau_\theta$, T_{obj} 为物体表面温度, T_{refl} 为反射环境温度, T_{atm} 为大气温度。

由普朗克辐射定律, 变换式 (1) 可得^[9]

$$T_{obj}^n = \tau_\theta [\varepsilon T_{obj}^n + (1 - \alpha) T_{refl}^n] + \varepsilon_\theta T_{atm}^n \quad (2)$$

式中, T_{obj}' 为热像仪指示的辐射温度。当被测表面满足灰体条件即 $\varepsilon = \alpha$ 时, 若认为大气 $\varepsilon_\theta = \alpha_\theta = 1 - \tau_\theta$, 则得出灰体表面的发射率计算公式^[9]

$$\varepsilon = \frac{T_{obj}'^n - \tau_\theta T_{refl}^n - (1 - \tau_\theta) T_{atm}^n}{\tau_\theta (T_{obj}'^n - T_{refl}^n)} \quad (3)$$

变换式 (3) 可得^[9]

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{T_{obj}'}{T_{obj}}\right)^n - \tau_\theta \left(\frac{T_{refl}}{T_{obj}}\right)^n - (1 - \tau_\theta) \left(\frac{T_{atm}}{T_{obj}}\right)^n}{T_\theta \left[1 - \left(\frac{T_{refl}}{T_{obj}}\right)^n\right]} \quad (4)$$

当被测表面温度远远大于环境温度时, $T_{refl}/T_{obj} \approx 0$ 。在室内进行实验时, 认为大气温度为环境温度, 即 $T_{atm} = T_{refl}$, 因此式 (4) 变换为^[9]

$$\varepsilon = \left(\frac{T'_{obj}}{T_{obj}} \right)^n \quad (5)$$

2.2 物体表面发射率计算的试验结果分析

本次实验在室内进行, 为了消除或降低由背景辐射变化引起的误差, 设置了背景屏蔽装置。采用的热像仪型号为 FLIR A645sc, 光谱范围选为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 即 $n=3.9889$ ^[3]。环境温度为 18°C , 目标源温度为 265°C 。目标辐射源是铝合金板, 通过温控设备使所感兴趣区域的温度分布均匀, 目标源的温控设备可以读出目标源的真实温度。用温度计测量环境温度, 认为环境温度即为大气温度。大气透射率有很多方式可以获得, 如分子吸收的波带模型法和表格法等^[10]。

由于是近距离标定目标源发射率, 因此室内的大气透射率 τ_o 设为 1。

通过标准黑体对红外热像仪进行标定, 得出温度曲线。根据红外热像仪的测温原理计算出被测物体的表面发射率。试验过程如下: 通过温控设备设置目标源的温度, 温度的测量精度为 0.5°C ; 实际测试环境参数, 利用 Lowtran 软件计算得到大气透射率; 将室内环境设置为 1; 将热像仪的发射率设置为多个不同值 (本次设为 8 个); 将热像仪的参数 ε 设置为不同的值, 对 T_{obj} 进行多次测量 (三次以上), 获得八组数据。用第一节神经网络训练结果对八组数据进行标定, 得到标定温度 T_{obj}^{biao} , 利用 Matlab 将 T_{obj}^{biao}/T_{obj} 与目标源发射率 ε 进行线性拟合, 计算出 a 和 b , 由式 (5) 可计算得出发射率。热像仪显示温度与发射率对应关系的实验数据见表 3。

表 3 热像仪的显示温度与发射率对应关系的实验数据

热像仪温度 $T'_{obj}(^\circ\text{C})$	标定温度 $T_{obj}^{biao}(^\circ\text{C})$	发射率 ε	变量 T_{obj}^{biao}/T_{obj}
82.3	81.1652	1.000	0.4774
152.5	151.1755	0.100	0.5705
186.2	184.7378	0.070	0.7595
202.6	201.2749	0.060	0.8408
224.2	222.8162	0.080	0.6971
251.0	248.9955	0.050	0.9396
256.2	253.9904	0.048	0.9585
263.4	260.8560	0.045	0.9844

由于试验时对红外热像仪进行了标定, 且设置了不同的发射率, 对物体的辐射温度进行了多次测量, 因此有效地消除了系统误差。采用 Matlab 对测量数据进行了曲线拟合。实验求得目标源的表面发射率为 0.050。由于铝合金的参考发射率范围在 0.05~0.1 之间, 为了验证发射率的准确性, 将红外热像仪的发射率参数设置为 0.050, 其他参数不变, 获得红外热像仪的温度平均值为 264.8°C 。实验结果表明, 此方法在实际工程中容易实现, 且实验结果准确。

3 结论与分析

为了有效地消除系统误差, 减小红外热像

仪的测温误差, 通过用标准黑体对热像仪进行标定, 得到了不同温度下的黑体与热像仪温度之间的关系。根据实验数据, 选择拟合对比结果精度较高的 BP 神经网络算法获得标定曲线。

从红外热像仪接收的辐射能量测温理论出发, 获得了一种计算发射率的方法。当被测物体的表面温度远远大于环境温度时, 对温度的计算公式采取近似处理。由标定曲线对热像仪显示的辐射温度的平均值进行校正, 最后对发射率的计算求解进行线性拟合。通过试验对计算结果进行了验证, 证明试验结果准确。

(下转第 18 页)