

非制冷红外热成像测温关键技术研究*

曹彦鹏^{1,2}, 张圆圆^{1,2}, 杨将新^{1,2}

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州, 310027)

(2. 浙江大学浙江省先进制造技术重点研究实验室 杭州, 310027)

摘要 非制冷红外热成像测温过程受环境温度、测温距离和大气湿度等诸多因素影响,因此在复杂环境中实现高精度测温颇具挑战。为了满足复杂环境中精确测温的需求,分析并研究了非制冷红外热成像测温误差的主要影响因素和关键补偿技术。首先,针对非制冷红外探测器输出辐射温度易受环境影响的问题,设计了基于粒子群算法优化反向传播神经网络的非制冷红外探测器辐射温度预测算法,实现了不同工作温度下辐射温度的精确预测;其次,针对测温过程中的红外辐射大气衰减现象,设计了基于大气传输软件的近地红外辐射大气透射率计算方法,实现了大气透射率的准确、快速、便捷计算;最后,整合关键误差补偿技术形成了完整的非制冷红外热成像测温方法,并实验验证了以上关键技术对于提高红外测温精度和环境适应性的有效性。

关键词 非制冷红外热成像;温度测量;大气透射率;辐射温度

中图分类号 TN219;TH811

1 问题的引出

红外热成像将可见光视觉拓展至人眼不可见的红外光谱波段,在军事、工业及民生等领域得到广泛应用,如导弹制导^[1]、电气设备检测^[2]、气体泄漏无损检测^[3]、火灾探测与预防^[4]以及生物学诊断^[5]等,该技术应用实例如图1所示。近年来,随着新型红外材料和信息处理技术的不断发展,红外热成像技术可进一步提高精度、可靠性和应用范围,向高性能、智能化、低成本的方向发展。

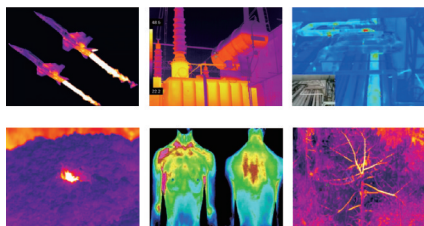


图1 红外热成像技术应用实例

Fig.1 Examples of applying infrared thermal imaging technology

温度测量是红外热成像技术的重要应用之一。红外热成像测温技术根据物体的辐射能量计算被测温物体的表面温度,具有远距离、大面积、非接触性及高实时性等诸多优势,在温度测量领域发挥了重要作用。人体红外热成像测温如图2所示,可以通过

红外热成像测温技术在大场景范围中对多个目标的温度进行精确测量,从而判断健康状况。

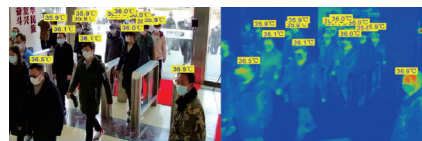


图2 人体红外热成像测温

Fig.2 Human body infrared thermal imaging temperature measurement

红外热成像测温技术需借助红外热成像系统捕捉红外辐射能量,其工作原理如图3所示。光学系统收集观察目标的红外辐射信号后,传输至红外探测器转换成电信号,并通过信号处理系统将微弱的电信号进行转换和放大后输出二维红外图像,记录目标物体表面温度分布。红外热成像系统根据其成像原理和工作温度分为制冷和非制冷两类。其中,基于光子探测器的制冷红外热成像系统具有极高的

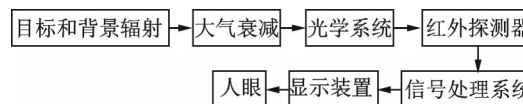


图3 红外热像仪工作原理图

Fig.3 Schematic diagram of infrared thermal imager operation

* 国家自然科学基金资助项目(52075485)

收稿日期:2024-03-31;修回日期:2024-04-10

测温灵敏性,但需要额外的低温制冷设备,导致系统的制造和维护成本昂贵。相较而言,非制冷红外热成像系统则具有启动快、功耗低、体积小、重量轻、寿命长及成本低等诸多优点,已成功应用于诸多工业检测领域,具有广阔的市场应用前景。

对于任何近似灰体的被测目标,红外热成像系统将红外图像灰度值转换为辐射温度后,可根据式(1)^[6]计算得出待测物体表面的真实温度

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T_r^n - (1 - \epsilon) T_a^n - \left(\frac{1}{\tau_a} - 1 \right) T_a^n \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

其中: T_0 为待测物体表面的真实温度; ϵ 为待测物体的表面发射率; τ_a 为大气透射率; T_r 为热成像系统输出辐射温度,是将该系统接收到的辐射能量等效为黑体辐射时得到的温度; T_a 为背景环境温度; T_a 为大气温度; n 为与工作波段相关的常数(3~5 μm 中波红外波段内, n 取值为9.2554;8~14 μm 长波红外波段内, n 取值为3.9889^[7])。

根据式(1)可知,红外测温结果受物体发射率、环境和大气温度、大气透射率以及系统输出辐射温度等诸多因素影响^[8]。其中,物体发射率、环境和大气温度等参数可以通过查表、气象站观测等方式获取具体数值,因此需要研究辐射温度和大气透射率的精确计算方法,从而实现高精度红外热成像测温。

红外热成像测温本质为定标测温,需要针对定标原理、数据处理和响应建模开展研究工作。陆子凤^[9]通过标准黑体定标实验,构建了探测器响应特性的函数关系式,分析了测温精度的误差来源。辐射定标数据处理的常用方法包括查表法和数据拟合法。查表法操作简单,但在宽动态范围下数据的采集和查询过程繁琐,而最小二乘法和神经网络模型等数据拟合法的精度、鲁棒性和实时性更优^[10]。Huang等^[11]基于最小二乘法的非线性回归方法,拟合出探测器输出灰度与温度的响应函数关系。张云峰^[12]提出了基于加权最小二乘法优化探测器响应曲线的方法。李云红^[13]利用BP神经网络算法处理定标数据,拟合精度得到进一步提升。由于非制冷红外探测器输出辐射温度受环境温度波动的影响,吴越等^[14]提出一种可进行环境温度补偿的辐射定标方法,并证实在动态环境温度范围内温度测量误差可控制在2.4%以内。

大气透射率可以通过经验公式和专业大气传输软件进行计算。Zhao等^[15]根据大气组成分析了大气透射率的主要影响因素,并得到了相应的理论计算公式。经验公式法具有简洁、易操作、便于编程的

优势,但需要对大气模型进行简化,容易产生计算误差。基于LOWTRAN,MODTRAN及FASCODE等专业大气传输软件的计算精度较高。Sun等^[16]通过MODTRAN软件分析了水蒸气、二氧化碳等因素对大气透射率的影响。Aboalia等^[17]设计了一个基于LOWTRAN软件的大气透射率计算模型,并使用长波红外热像仪、黑体源和气象站开展系列实验,验证了该大气透射率计算模型的可行性。Wei等^[18]建立了一种大气辐射传输模型,用于快速计算1~25000 cm^{-1} 波段的大气透射率。然而,专业大气传输软件不易进行二次开发,输入数据类型繁多且无法有效获取,计算实时性有待进一步提高。

为了提升非制冷红外热成像系统的测温精度和稳定性,笔者提出了一种适用于不同环境温度下辐射温度预测算法和一种准确高效的大气透射率计算方法,如图4所示。通过现场实验,验证了以上关键技术可以有效地提高非制冷红外热成像测温精度和环境适应性。

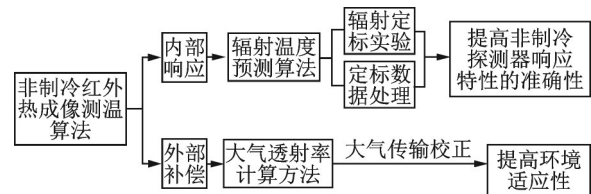


图4 非制冷红外热成像测温方法框架图

Fig.4 Framework diagram of uncooled infrared thermal imaging temperature measurement method

2 复杂环境下红外测温关键技术

2.1 非制冷红外探测器辐射温度预测算法

非制冷红外探测器的响应特性易受环境温度波动的影响,进而严重影响后续测温结果的精度和稳定性。研究适应不同工作环境温度的辐射定标数据采集和处理方法,构建非制冷红外探测器输出灰度值与辐射温度的准确映射关系,是实现复杂环境中高精度红外测温的关键环节。

2.1.1 辐射定标实验

辐射定标实验主要用于红外热成像系统输出数据的调节与校准。借助已知光谱强度的辐射源,通过标定不同强度辐射源下红外系统输出结果,建立红外图像灰度值与辐射温度间的关系,其关系曲线称为探测器响应曲线。

常用的辐射定标方法主要包含平行光管辐射定标、直接成像辐射定标、远距离小源辐射定标以及近

距离扩展源辐射定标^[19]。本研究采用近距离扩展源辐射定标法,如图 5 所示,定标实验相关的设备包括非制冷长波红外相机、面源黑体及控温箱。近距离定标实验过程中可以忽略大气衰减影响,认为大气透射率和辐射率近似为 1。此外,在实验中使用面源黑体作为定标热源,认为目标发射率近似为 1。将以上参数代入式(1)可知,红外系统所测得的辐射温度就是黑体表面的真实温度。

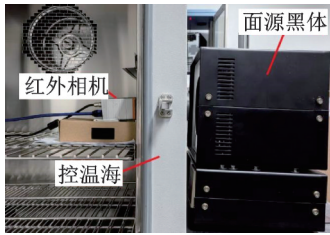


图 5 近距离扩展源的辐射定标示意图

Fig.5 Schematic diagram of radiation calibration for close range extended sources

在辐射定标实验中,红外相机采集黑体热源的红外图像,控温箱模拟并调整红外热成像系统的工作环境温度。不同定标点的工作环境温度、黑体温度和红外图像灰度值的三维数据曲面图如图 6 所示。根据辐射定标实验采集定标数据,可进一步探索环境温度对非制冷探测器响应特性的影响规律,从而构建不同工作环境下非制冷红外探测器的辐射温度预测算法。

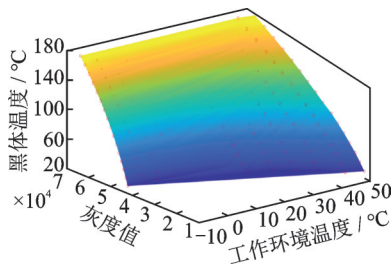


图 6 定标点数据曲面图

Fig.6 Data surface map at calibration points

2.1.2 辐射温度预测算法

相较于常用的最小二乘法数据拟合方法,BP 神经网络具有预测精度高、泛化能力强和容错性高等优点,更适应于完成复杂映射模型的构建;但 BP 神经网络初始训练参数是随机设置的,可能导致模型训练收敛速度慢且容易陷入局部极小值,难以达到全局最优。

为了提升 BP 神经网络的预测精度和收敛速度,笔者采用收敛速度快且效率更高的粒子群算法

优化 BP 神经网络 (particle swarm optimization for backpropagation neural networks, 简称 PSO-BP) 模型,其拓扑结构见图 7。PSO-BP 网络模型采用 2 层隐含层及 7 个隐含节点的设计预测辐射温度。网络输入为图像灰度值与探测器温度,即输入层节点数为 2;输出为辐射温度,即输出层节点数为 1。

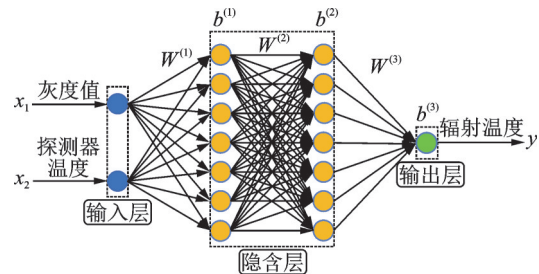


图 7 PSO-BP 神经网络模型的拓扑结构

Fig.7 The topological structure of PSO-BP neural network model

PSO 算法在解空间中初始化一系列代表性粒子,其中每个粒子象征一组 BP 神经网络的权重和偏置的取值(包括位置、速度以及适应度值 3 个关键属性)。在适应度函数制约下 PSO 算法持续迭代优化,粒子逐渐趋向于全局极值以提升网络的预测精度和泛化能力。本研究采用最大迭代次数为 100、种群规模为 50、惯性权重为 0.8、个体学习因子为 2 以及社会学习因子为 2 的 PSO 设定方案。PSO 优化 BP 网络前后的训练迭代性能如图 8 所示,优化后迭代次数由 6 938 次降至 2 315 次,减少了 67%,显著缩短了训练时间。实验结果显示,PSO 算法寻优能力优秀,能迅速优化 BP 神经网络的初始参数。

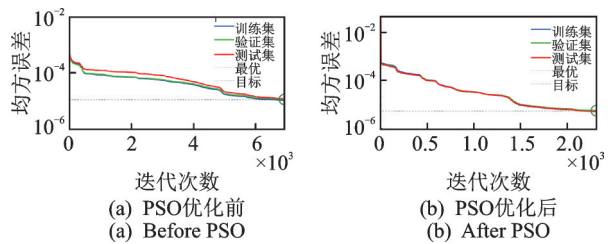


图 8 PSO 优化 BP 网络前后训练迭代性能

Fig.8 PSO optimization of BP network before and after training iteration performance

2.1.3 算法性能分析

针对 12 600 个定标训练样本,采用均方根误差 (root-mean-square error, 简称 RMSE) 和决定系数 R^2 两项指标评估 S 型曲线最小二乘法、BP 神经网络和 PSO-BP 神经网络 3 种算法的拟合能力如表 1 所示。3 种算法在训练样本拟合度上的优劣顺序为

PSO-BP>BP>S型曲线最小二乘法,其中PSO-BP在训练样本的RMSE指标降至最小二乘法的50%,相较优化前的BP网络提升了26%。

表1 不同方法对训练样本的拟合能力

Tab.1 The fitting ability of different methods to training samples

算法类型	RMSE/°C	R ²
S型曲线最小二乘法	0.441 1	0.999 9
BP	0.291 0	1.000 0
PSO-BP	0.215 0	1.000 0

为了进一步验证 PSO-BP 神经网络的预测效果,选择 4 220 组非定标数据作为非训练样本集,采用平均绝对误差(mean absolute error,简称 MAE)和平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error,简称 MAPE)这 2 个指标来评价预测能力,结果如表 2 所示。PSO-BP 算法的 MAE 控制在 0.3°C 以内,较优化前提高了 25%。

表2 不同方法对非训练样本的预测能力

Tab.2 The predictive ability of different methods on non-training samples

算法类型	MAE /°C	MAPE /%
S型曲线最小二乘法	0.529 8	1.304 5
BP	0.378 2	0.912 5
PSO-BP	0.284 5	0.680 7

实验数据表明,PSO-BP 神经网络对探测器响应曲线拟合和辐射温度预测均取得最佳效果。在不同工作环境下,PSO-BP 神经网络算法的平均绝对误差小于 0.3°C,可实现非制冷红外热成像测温系统的高精度、稳定辐射温度预测。

2.2 大气透射率计算方法

红外辐射在大气传输过程中会产生因气体分子吸收、气溶胶散射和雨雪条件损耗等因素导致的衰减效应,大气透射率是评估红外辐射大气衰减程度的重要指标。针对大气透射率经验公式计算方法精度欠佳和专业大气传输软件参数繁多、操作复杂的问题,笔者提出了一种适用于近地红外辐射大气透射率的计算方法,其兼具经验公式法的实时性和大气传输软件的准确性。

2.2.1 近地大气透射率计算参数的简化和转换

根据各衰减因素作用原理,红外辐射在 0.3~14 μm 波段的大气透射率 $\tau_a(\lambda)$ 的计算如下

$$\tau_a(\lambda) = \exp \left[-\frac{rf}{6.67} \mu_{0\text{H}_2\text{O}} R - \mu_{0\text{CO}_2} R - \frac{3.912}{V_m} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3} D - 0.66 J_1^{0.66} D - 6.5 J_2^{0.7} D \right] \quad (2)$$

其中: λ 为波长; $\mu_{0\text{H}_2\text{O}}$ 、 $\mu_{0\text{CO}_2}$ 分别为水蒸气和二氧化碳在气温为 5°C、相对湿度为 100% 条件下的光谱吸收系数; r 、 f 分别为对应环境中相对湿度和达到饱和状态时空气中所含有的水蒸气质量; R 为海平面水平路程; V_m 为大气能见度; D 为传输距离; J_1 为降雨强度; J_2 为降雪强度; $\mu_{0\text{H}_2\text{O}}$ 、 $\mu_{0\text{CO}_2}$ 、 f 这 3 个参数可根据文献[20]的实验数据查表获得。

式(2)中包含多个不易测量的参数,需要转换为其他易测参数,以降低实际测量难度。100 m 测距内的气压变化相较于地面大气压可以忽略,可视为水平路径探测,能够通过大气传输软件的近地单层大气模式进行计算;根据实验数据和文献[21],大气能见度可通过相对湿度和风速来获取;降雨和降雪强度可转为降水量。简化后的近地红外辐射大气透射率计算所需输入参数包括传输距离、大气温度、相对湿度、风速、大气压和降水量。

2.2.2 基于大气传输软件的大气透射率计算方法

通过 LOWTRAN, MODTRAN 及 FASCODE 等专业大气传输软件可以实现大气透射率的高精度计算,其中低光谱分辨率的 LOWTRAN 运算性能高、适用范围广,因此本研究对 LOWTRAN7 进行二次开发。

将实际场景测温参数数据转换为大气传输软件输入格式,创建数据输入文件 TAPE5,其具体内容如图 9 所示。TAPE5 包含 5 个数据卡片: CARD1 确定大气模式,本研究选择水平路径大气模型; CARD2 确定气溶胶和云模式,本研究选择海军海洋型气溶胶模式和无云模式,子卡片 CARD2C, 2C1 及 2C2 用于选择和确定大气层数及气体分子含量,本研究选择单层大气,设置近地参数即可; CARD3 确定几何路径参数; CARD4 确定计算的光谱区和步长,根据红外系统波段设置即可; CARD5 控制程序的停止或再运行。

```

CARD 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0.000 0.00
CARD 2 3 0 1 1 0 0 0.000 2.500 2.500 0.000 0.019
CARD 2C 1 1 0myAtm
CARD 2C1 0.019 1.028e+03 2.000e+01 5.000e+01 8.638e+15 9.820e+11ABH
CARD 2C2 7.723e+12 2.794e+12 3.777e+13 5.322e+18 7.619e+09 7.619e+05
1.425e+10
CARD 3 0.019 0.010 90.000 0.001 0.000 6371.000 0
CARD 4 715.000 1250.000 5.000
CARD 5 0

```

图9 数据输入文件 TAPE5 的具体内容

Fig.9 The specific content of the data input file TAPE5

根据输入文件 TAPE5 运行封装好的程序,生成包含大气透射率的数据输出文件 TAPE6,部分内容如图 10 所示,红外测温系统可使用该数据进行外部大气修正。

```

1225. 8.163 0.9922 0.9930 0.9993 1.0000 1.0000 1.0000 0.9999
1230. 8.130 0.9928 0.9938 0.9991 1.0000 1.0000 1.0000 0.9999
1235. 8.097 0.9926 0.9938 0.9989 1.0000 1.0000 1.0000 0.9999
1240. 8.065 0.9917 0.9931 0.9987 1.0000 1.0000 1.0000 0.9999
1245. 8.032 0.9901 0.9918 0.9984 1.0000 1.0000 1.0000 0.9999
1250. 8.000 0.9879 0.9899 0.9981 1.0000 1.0000 1.0000 0.9999
INTEGRATED ABSORPTION FROM 715 TO 1250 CM-1 = 2.01 CM-1
AVERAGE TRANSMITTANCE = 0.9962
    
```

图 10 数据输出文件 TAPE6 的部分内容

Fig.10 Part of the content of the data output file TAPE6

2.2.3 方法性能分析

为了验证笔者所提大气透射率计算方法的精度和有效性,分别使用经验公式、LOWTRAN7 软件以及所提计算方法对不同大气条件下的红外辐射大气透射率进行计算。不同大气透射率计算方法的计算结果对比如表 3 所示。3 种方法在相同条件下的大气光谱透射率曲线如图 11 所示。经验公式与 LOWTRAN7 软件的计算结果相差显著,大气光谱透射率数值最大偏差达 0.2。本研究提出的计算方法与原软件的数据差异控制在 0.02 内,一致性较高。另外,输入参数数量、操作复杂度以及算法耗时相比于 LOWTRAN7 软件有明显下降,不同方法参数量和运行时间对比如表 4 所示。

实验结果表明,本研究所提方法计算的大气透射率数据与 LOWTRAN7 大气传输软件的计算结果一致性高,相差不超过 0.02,输入参数量减少了 80%,计算时间减少了 50%,在保证计算精度的同时提高了方法的便捷性和计算效率,证实了该方法

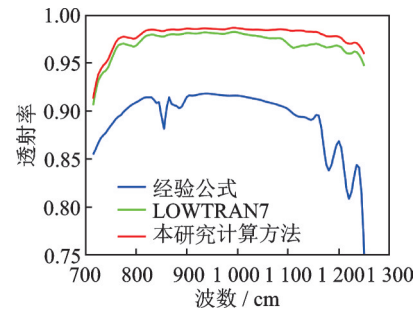


图 11 3 种方法的大气光谱透射率曲线

Fig.11 Atmospheric spectral transmittance curves for three methods

的可靠性和实际工程应用价值,可为红外测温系统进行大气衰减补偿提供有效的数据支持。

3 实验与结果

准确的辐射温度预测和大气透射率计算是实现复杂环境中非制冷红外热成像高精度测温的关键。以实验室标定环境下实际温度为 90°C 的黑体热源为测温对象,应用基于 PSO-BP 神经网络的非制冷红外探测器辐射温度预测算法对工作环境温度补偿前后辐射温度进行预测,结果对比如表 5 所示。由表 5 可知,提出的基于 PSO-BP 神经网络的非制冷红外探测器辐射温度预测算法,在不同环境温度下实现了辐射温度的精确预测,成功校正了由于工作环境温度改变而产生的测温误差。

通过笔者提出的近地红外辐射大气透射率计算方法补偿外部大气对红外辐射的衰减,并进行测量温度校正。不同因素对测温结果影响贡献率如

表 3 不同大气透射率计算方法的计算结果对比

Tab.3 Comparison of calculation results of different atmospheric transmittance calculation methods

组别	大气条件						大气透射率计算结果		
	大气温度/°C	距离/m	相对湿度/%	降水量/(mm·h ⁻¹)	海拔高度/m	大气压/Pa	经验公式	LOW-TRAN	本研究计算方法
1	-20	8	10	7	4	101 277	0.979 5	0.986 0	0.986 1
2	-10	60	40	0	0	101 325	0.935 4	0.979 0	0.981 6
3	-5	17	25	18	12	101 181	0.902 3	0.953 7	0.953 9
4	0	20	70	2	25	101 025	0.813 2	0.969 5	0.974 9
5	5	22	33	12	7	101 241	0.832 8	0.949 3	0.949 0
6	10	1	50	5	80	100 368	0.987 7	0.993 3	0.996 2
7	15	3	88	9	35	100 905	0.891 2	0.987 9	0.987 7
8	20	6	40	14	18	101 109	0.893 9	0.971 1	0.979 1
9	25	46	5	3	21	101 073	0.853 2	0.948 2	0.947 4
10	30	12	94	0	50	100 726	0.909 5	0.974 3	0.965 8

表4 不同方法参数数量和运行时间对比

Tab.4 Comparison of parameter quantity and running time of different methods

方法	输入参数个数	计算时间/ms
LOWTRAN7	40	32.20
本研究计算方法	7	17.39

表5 工作环境温度补偿前后的辐射温度结果对比

Tab.5 Comparison of radiation temperature results before and after environment temperature compensation

工作环境 温度/°C	补偿前		补偿后	
	测量 值/°C	相对误 差/%	测量 值/°C	相对误 差/%
5	106.16	17.96	89.98	-0.02
15	102.40	13.78	89.90	-0.11
20	98.72	9.69	89.85	-0.17
35	64.29	-28.57	89.68	-0.36

表6 红外辐射大气衰减校正前后的测温结果对比

Tab.6 Comparison of temperature measurement results before and after infrared radiation atmospheric attenuation correction

组别	距离/cm	大气温度/°C	相对湿度/%	实际温度/°C	校正前		校正后	
					测温/°C	相对误差/%	测温/°C	相对误差/%
1	140	24.5	36	92.30	93.82	1.65	92.58	0.30
2	120	16.0	54	70.60	91.68	29.86	70.54	0.09
3	80	10.0	47	144.40	116.30	19.46	144.63	0.16

为了进一步检验以上关键技术的有效性,将其整合开发出完整的复杂条件下非制冷长波红外测温方法。测温具体流程如下:首先,使用红外热成像系统采集目标的红外图像;其次,利用辐射温度预测算法将红外图像灰度值转为辐射温度信息;然后,实时计算大气透射率进行红外辐射大气衰减校正;最后,将物体发射率、环境和大气温度、辐射温度及大气透射率等参数输入测温公式(1),得出最终测温结果。为了涵盖金属和非金属材料等典型工业材料的测温需求,实验样本除了发射率为1的标准黑体热源外,增设了5052铝合金、Q235钢和T300碳纤维3种不同材质发射率的样本,并通过温度可调的外部热源以热传递的方式来实现铝合金、钢和碳纤维样本表面温度的调整。等待样本温度稳定后,利用测温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的Fluke 566-2红外点温仪近距离测量获得的温度值作为样本温度真值,现场实验示意图如图13所示。

现场测温实验中,降水量设为0 mm/h,风速设为2.5 m/s,大气压为102 840 Pa。每组温度点测量5次,取平均值作为测量值。在3种不同温度和湿度

图12所示,其中大气透射率计算所需参数中的大气温度、距离和相对湿度对物体表面温度测量影响较大。以发射率为1的标准黑体热源为测温对象,使用该方法对大气衰减校正前后的测温结果对比如表6所示。由表6可知,提出的近地红外辐射大气透射率计算方法有效地消除了大气影响带来的测量误差,提高了室外测温精度。

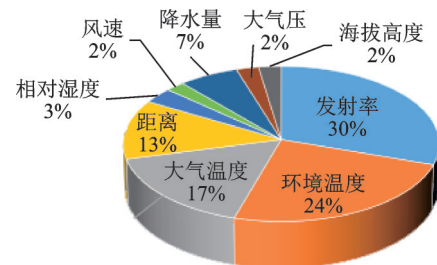


图12 不同因素对测温结果影响贡献率

Fig.12 Contribution rate of the influence of various factors on temperature measurement results

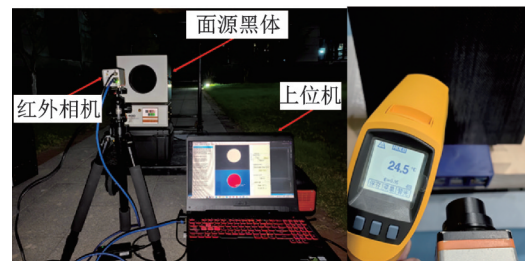


图13 现场实验示意图

Fig.13 Schematic diagram of on-site experiment

的大气条件下,实验样本分别设定或加热至2组不同温度,并在不同距离下进行测温实验。表7,8分别为不同发射率的黑体和铝合金样本的测温结果,测试样本可视化图示见图14。实验结果表明,本研究所提测温方法的绝对误差均在 1°C 以内。市场上现有的红外热像仪的测温精度大多为 $\pm 2^\circ\text{C}$,个别高端红外测温仪器可达到 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。可见,笔者提出的测温方法精度较高,可用于研发高精度非制冷长波红外热成像测温系统及众多工业领域的温度测量与状态监控任务中,具有实际工程应用价值。

表 7 发射率为 1 的黑体测温结果
Tab.7 Temperature measurement results of blackbody with an emissivity of 1

距离/cm	温度	大气条件					
		大气温度为 24.5℃		大气温度为 16.0℃		大气温度为 10.0℃	
		相对湿度为 36%		相对湿度为 54%		相对湿度为 47%	
20	实际值	54.80	92.30	70.60	156.70	90.30	144.40
	测量值	54.98	92.75	70.79	156.48	90.58	144.73
	误差	0.18	0.45	0.19	-0.22	0.28	0.33
60	测量值	55.03	92.60	70.78	156.88	90.54	144.61
	误差	0.23	0.30	0.18	0.18	0.24	0.21
100	测量值	54.96	92.58	70.64	156.82	90.11	144.29
	误差	0.16	0.28	0.04	0.12	-0.19	-0.11
140	测量值	54.98	92.59	70.51	156.42	90.01	144.19
	误差	0.18	0.29	-0.09	-0.28	-0.29	-0.21

表 8 发射率为 0.35 的铝合金测温结果
Tab.8 Temperature measurement results of aluminum alloy with an emissivity of 0.35

距离/cm	温度	大气条件					
		大气温度为 24.5℃		大气温度为 16.0℃		大气温度为 10.0℃	
		相对湿度为 36%		相对湿度为 54%		相对湿度为 47%	
40	实际值	33.80	49.80	26.50	35.70	30.60	61.20
	测量值	33.53	50.00	26.62	35.76	30.77	61.30
	误差	-0.27	0.20	0.12	0.06	0.17	0.10
80	测量值	34.12	49.79	26.77	35.91	30.67	61.09
	误差	0.32	-0.01	0.27	0.21	0.07	-0.11
120	测量值	34.34	50.06	26.31	35.80	30.62	60.94
	误差	0.54	0.26	-0.19	0.10	0.02	-0.26
160	测量值	34.13	50.14	26.30	35.55	30.75	60.79
	误差	0.33	0.34	-0.20	-0.15	0.15	-0.41
200	测量值	34.37	50.32	26.29	35.09	30.27	60.73
	误差	0.57	0.52	-0.21	-0.61	-0.33	-0.47

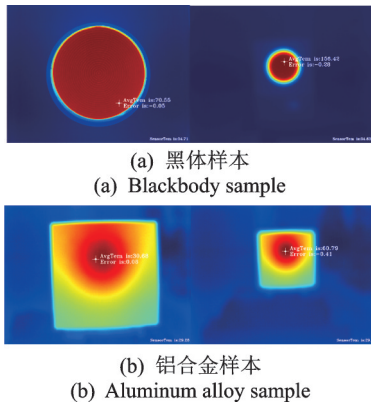


图 14 测试样本可视化图示

Fig.14 Example of test sample visualization

4 结 论

1) 针对复杂环境下高精度测温任务,提出了非制冷红外探测器辐射温度预测和大气透射率计算关键技术。在此基础上,提出了完整的非制冷红外热成像测温方法,实验验证了其在复杂环境下的测温

精度和稳定性。

2) 设计了精度高、适用于多种场景、响应快速以及操作简易的非制冷红外热成像测温方法,可应用于众多领域的温度测量任务,研究成果对复杂环境下红外测温系统的设计具有参考价值,同时具有重要的工程应用价值。

3) 在实际测温任务中制约红外测温精度的因素还有很多,如测量角度、红外相机分辨率和被测物体材质都会对测温结果产生影响,因此需要进一步研究红外测温过程中对以上干扰因素的形态建模和偏差矫正方法。

参 考 文 献

[1] LEE S, SHIN J, KIM H G, et al. Deep end-to-end imitation learning for missile guidance with infrared images [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2023, 21(10): 3419-3429.

[2] KUMAR D, ANSARI M A. Condition monitoring of

- electrical assets using digital IRT and AI technique[J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2018, 5(3): 623-634.
- [3] DOSHVARPASSAND S, WANG X. Sub-surface defect depth approximation in cold infrared thermography[J]. Sensors, 2022, 22(18): 7098.
- [4] MA Q, ZHAO M, SUN L, et al. Fire detection algorithm of infrared thermal imaging in petrochemical area based on improved YOLOv4-Tiny framework and time-domain feature analysis[C]//Conference on Infrared, Millimeter, Terahertz Waves and Applications (IMT2022). Shanghai, China: SPIE, 2023: 120-138.
- [5] GOMATHIP, MUNIRAJ C, PERIASAMY P S. Digital infrared thermal imaging system based breast cancer diagnosis using 4D U-Net segmentation[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2023, 85: 104792.
- [6] ZHANG Y, WANG Z, FU X, et al. An experimental method for improving temperature measurement accuracy of infrared thermal imager[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 102: 103020.
- [7] BUDZIER H, GERLACH G, MÜLLER D. Thermal infrared sensors: theory, optimisation, and practice[M]. Chichester, West Sussex, UK: Hoboken NJ Wiley, 2011:149-176.
- [8] 杨立, 杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012:60-65.
- [9] 陆子凤. 红外热像仪的辐射定标和测温误差分析[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2010.
- [10] NI W, NØRGAARD L, MØRUP M. Non-linear calibration models for near infrared spectroscopy[J]. Analytica Chimica Acta, 2014, 813: 1-14.
- [11] HUANG F, SHEN X, LIU J, et al. Research on radiometric calibration for super wide-angle staring infrared imaging system[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 61: 9-13.
- [12] 张云峰. 基于加权最小二乘法的红外辐射定标[J]. 液晶与显示, 2012, 27(6): 832-836.
ZHANG Yunfeng. Radiance calibration based on weighted least square method[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(6): 832-836. (in Chinese)
- [13] 李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [14] 吴越, 朱之贞, 方勇华, 等. 非制冷型长波红外光谱仪的辐射定标方法[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 23-29.
WU Yue, ZHU Zhizhen, FANG Yonghua, et al. Radiation calibration method using uncooled long-wave infrared spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 23-29. (in Chinese)
- [15] ZHAO X, CUI L, ZHAO Z, et al. Influence of atmospheric transmittance on infrared temperature measurement accuracy[C]//2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC). Dalian, China: IEEE, 2021: 278-281.
- [16] SUN D, ZHENG H. Simulation study of infrared transmittance under different atmospheric conditions[J]. Journal of Physics Conference Series, 2022, 2356(1): 1-16.
- [17] ABOALIA H, MAHMOUD A, MOKHTAR A M. Infrared temperature measurement accuracy based on atmospheric transmittance[C]//2022 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt). Alexandria, Egypt: IEEE, 2022: 1-4.
- [18] WEI H, CAO Y, CHEN X. A combined atmospheric radiative transfer (CART) model and its applications for cirrus clouds simulations[C]//Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques and Applications IV. Kyoto, Japan: SPIE, 2012: 852709.
- [19] YANG G, YU Y, SUN Z, et al. Radiometric calibration algorithm for high dynamic range infrared imaging system[J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 130: 104607.
- [20] 路远, 凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算[J]. 红外技术, 2003, 25(5): 45-49, 53.
LU Yuan, LING Yongshun. The simple method to calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation[J]. Infrared Technology, 2003, 25(5): 45-49, 53. (in Chinese)
- [21] 刘骞, 盛立芳, 王园香, 等. 气象要素对中国大气能见度长期变化影响的定量研究[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(1): 47-55.
LIU Qian, SHENG Lifang, WANG Yuanxiang, et al. Quantitative study of the effect of meteorological variables on the long-term variation of visibility in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(1): 47-55. (in Chinese)



第一作者简介:曹彦鹏,男,1981年7月生,研究员、博士生导师。现为中国振动工程学会理事、中国振动工程学会动态测试专业委员会副秘书长、国际电气与电子工程师协会 IEEE 高级会员 (Senior Member)、《振动、测试与诊断》编委、《振动工程学报》青年编委。主要研究方向为多源数据驱动的机电装备无损检测与故障诊断技术。在光学测量和无损检测领域国际权威期刊上发表论文 70 余篇。
E-mail: caoy@zju.edu.cn