

文章编号: 1672-8785(2025)08-0030-08

## 红外热像仪发射率补偿模型研究

许彰理<sup>1</sup> 田浩彬<sup>1</sup> 李学磊<sup>1</sup> 崔 蕾<sup>1\*</sup> 尹 波<sup>1</sup> 钟应龙<sup>2</sup>

(1. 上海第二工业大学智能制造与控制工程学院, 上海 201209;

2. 上海第二工业大学能源与材料学院, 上海 201209)

**摘 要:** 红外热像仪作为非接触式测温工具在热冲压工艺中具有显著优势, 但其测量精度易受表面发射率、观测角度以及目标温度等多种因素的影响。提出了一种基于动态发射率补偿的测温优化方法。采用投影测量技术精准获取复杂曲面零件的空间角度参数, 然后通过实验量化分析观测角度和温度值对测温偏差的作用规律; 采用机器学习算法构建发射率与多维变量之间的非线性映射模型, 实现了动态发射率参数的智能补偿。实验结果表明, 经补偿后测温系统误差可稳定控制在 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 精度比固定发射率模式提升 60%, 为高精度红外测温在智能制造场景中的应用提供了有效解决方案。

**关键词:** 红外技术; 温度补偿; 机器学习; 投影法

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.08.005

## Research on the Emissivity Compensation Model of Infrared Thermal Imagers

XU Zhang-li<sup>1</sup>, TIAN Hao-bin<sup>1</sup>, LI Xue-lei<sup>1</sup>, CUI Lei<sup>1\*</sup>, YIN Bo<sup>1</sup>, ZHONG Ying-long<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University,

Shanghai 201209, China; 2. School of Energy and Materials Science, Shanghai

Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

**Abstract:** As a non-contact temperature measurement tool, infrared thermal imagers offer significant advantages in hot stamping processes. However, their measurement accuracy is susceptible to multiple factors, including surface emissivity, observation angle, and target temperature. A temperature measurement optimization method based on dynamic emissivity compensation is proposed. Projection measurement technology is used to accurately obtain the spatial angular parameters of complex curved parts. Then, the effect of observation angle and temperature value on temperature measurement deviation is quantitatively analyzed through experiments. A machine learning algorithm is employed to construct a nonlinear mapping model between emissivity and multidimensional variables, enabling intelligent compensation of dynamic emissivity parameters. Experimental results show that after compensation, the temperature measurement system error can be stably controlled within the range of  $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , improving accuracy by 60% compared to the fixed emissivity mode. This method provides an effective solution for the application of high-precision infrared temperature measurement in intelligent

收稿日期: 2025-02-05

**作者简介:** 许彰理(1997-), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事热冲压加工控制、热像仪温度补偿方面的研究。

**\*通讯作者:** E-mail: cuilei@sspu.edu.cn

manufacturing scenarios.

**Key words:** infrared technology; temperature compensation; machine learning; projection method

## 0 引言

红外测温是一种常用的非接触式测温方式。它通过接收物体发出的红外辐射来测量温度, 不受测温条件的制约, 在工业上有非常广泛的应用。尤其是在热冲压领域, 红外热像仪被用作零件温度监控的重要手段<sup>[1-5]</sup>。

红外热像仪的测量准确性主要受现场环境、测量角度、温度区间、被测对象的几何形状及尺寸等因素的影响, 但由于缺少相应调节发射率的方法和手段, 温度测量数据偏差较大, 给现场带来一定的误导或误判<sup>[6-9]</sup>。

许多学者对红外测温影响因素进行了研究, 以期获得准确的测温数据。李国和等人<sup>[1]</sup>研究了发射率对温度测量的影响, 通过人工调整发射率来提高测温的准确性。王东等人<sup>[3]</sup>综合湿度、环境温度和大气压等研究了距离对红外测温的准确性的影响规律。张志强等人<sup>[7]</sup>认为距离对红外热像仪的测温结果几乎没有影响, 但角度对测温结果的影响很大。柯维娜<sup>[10]</sup>认为不同测量角度下金属的表面发射率不同, 且在法向观测角度大于  $80^\circ$  时急剧下降。Maturilli A 等人<sup>[9]</sup>发现热像仪的发射率在观测角度为  $40^\circ \sim 60^\circ$  时呈上升趋势。

以上红外热像仪的测温影响因素和规律没有形成统一的结论, 且高温条件下的发射率研究较少。研究人员对热像仪在使用过程中的实时性补偿研究极少。为了更加准确地测温, 根据测量条件对测温结果进行进一步的补偿。本文研究具有铝硅涂层的锰钢板在高温与低温环境下的角度和温度对发射率的影响。通过建立三维观测模型获取三维物体的观测角度, 结合其他影响因素以及在高温环境下获取实时的发射率矩阵, 实现对热像仪的实时性补偿。

## 1 设定发射率

在热像仪使用过程中需选择一系列固定参

数, 要对环境温度、大气透过率、设定发射率、反射温度等参数进行设定。其中最重要的参数就是发射率。

一般发射率是指物体本身的发射率, 其随物体的材质、厚度及表面粗糙度等变化而有明显的区别。设定发射率对红外热像仪测量结果的准确性具有决定性的影响<sup>[1]</sup>。金属材料或者非金属材料通常都有其推荐的发射率。设定发射率是指红外热像仪在测温时发射率的设定值而非物体本身的发射率, 其与物体本身特性、热像仪内部传感器都有关系。当被测物体的温度差异过大时, 全局使用相同的设定发射率进行测量, 导致测量结果的准确性较低。

有的厂家在提供热像仪时考虑到测温区域较大, 提供一种根据区域设置设定发射率的方法, 即通过手动设置不同区域的设定发射率来提高测温的准确性。这种手段在一定程度上能相对提高红外测温的准确性, 但对于复杂形状的零件, 尤其是存在折弯、翻边、压痕等特征的零件, 温度分布差异化比较明显, 粗略地划分区域显然无法满足测量精度的要求, 而且前期处理工作量大, 可移植性低。

## 2 测温实验

### 2.1 实验设计

一般补偿前红外热像仪所使用的设定发射率是 0.56。对于热冲压工艺, 板料在冲压前, 按照工艺要求温度应大于  $720^\circ\text{C}$ 。在高温区间, 热像仪的测温结果对设定发射率非常敏感。一般热冲压的板料的长度尺寸在  $1.5 \sim 2\text{ m}$  之间。从靠红外热像仪的近端到远端, 观测角度逐渐增大。另外, 在板料成形弯曲后, 角度变化更加明显, 如图 1 所示。

固定的设定发射率显然能对观测角度变化作出相应调整以提高精确度。虽然在零件成形以后对测量角度的敏感性有所降低, 但是零件

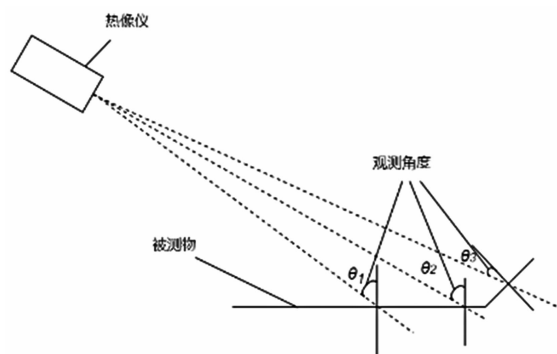


图 1 热像仪的观测角度示意图

成形后不再是一块平板，零件经过挤压、弯折等成形，不同位置的观测角度变化较大。因此，测温结果受测量角度的影响比较明显。零件成形前后的温度跨度比较大：成形前板料温度一般为 750~850 °C，成形后零件温度则在 150~400 °C 之间。测量温度跨度较大时，热像仪通常需要设定不同的发射率。本文使用红外热像仪测温时，选定一个常用的推荐设定发射率测量物体温度。在温度未补偿前所使用的设定发射率是 0.56。

文中采用热电偶和热像仪同时测温。加热装置最高可加热至 1200 °C，加热温度可调节。温控采用比例-积分-微分 (Proportion-Integration-Differentiation, PID) 调节方式，加热炉内置标准数显热电偶，显示温度即为加热炉内的实际温度。焊接热电偶采用 K 型热电偶，测温区域为 0~1000 °C，测温精度为 ±4‰。无纸记录仪的采样周期为 0.1~1 s。采用 FLIR-A400 型红外热像仪，其设定发射率可调，主要参数如表 1 所示。

实验温度范围是 100~400 °C 和 600~850 °C。将热电偶焊接在被测板料上。为符合现实

表 1 FLIR-A400 型红外热像仪的主要参数

| 性能参数 | 内容          |
|------|-------------|
| 波长范围 | 7.5~14 μm   |
| 像元间距 | 17 μm       |
| 测温范围 | -20~1500 °C |
| 视场角  | 42°×32°     |
| 分辨率  | 320×240     |
| 灵敏度  | 0.05 °C     |

热冲压生产工艺要求，板料在加热炉中加热至 950 °C 并保温 5 min；把板料转移至实验台，用红外热像仪对降温过程进行录像；温度每降低 10 °C 记录一组实验数据，然后反复操作。调整热像仪的观测角度，从 0°到 80°区间内每次调整 10°，保证板料位于热像仪的成像中心。实验台设计如图 2 所示。

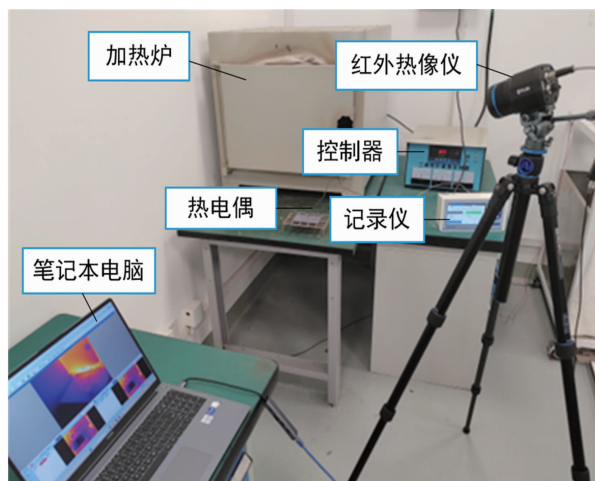


图 2 实验台设计

通过实验记录热电偶的温度、热像仪的温度、观测距离等。由于焊接点位置与板料表面不一致，取焊接点附近温度为热像仪在焊接点位置的显示温度，如图 3 所示。

## 2.2 观测角度影响实验

观测角度会对测温结果造成影响。在光学上一般用朗伯余弦定律描述法向辐射强度与实际辐射强度之间的关系：

$$\epsilon_{\lambda}(\alpha) = \epsilon_{\lambda} \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

红外测温是把被测物作为一个热源，将被测物的红外辐射强度转换为温度值。可以用  $\epsilon_{\lambda}$  和  $\epsilon_{\lambda}(\alpha)$  分别表示法线方向的发射率和面元在  $\alpha$  角方向的发射率。改变红外热像仪的设定发射率，使其显示温度与热电偶保持一致。实验发现，设定发射率在 0~20°时呈现下降趋势，随后在 20°~40°时进入平稳状态；从 40°到 60°，设定发射率逐步攀升；大于 60°后，设定发射率开始下降，并且随着角度增大，下降趋势明显。温度较低时，发射率在 40°~80°范围内的变化幅度更大。

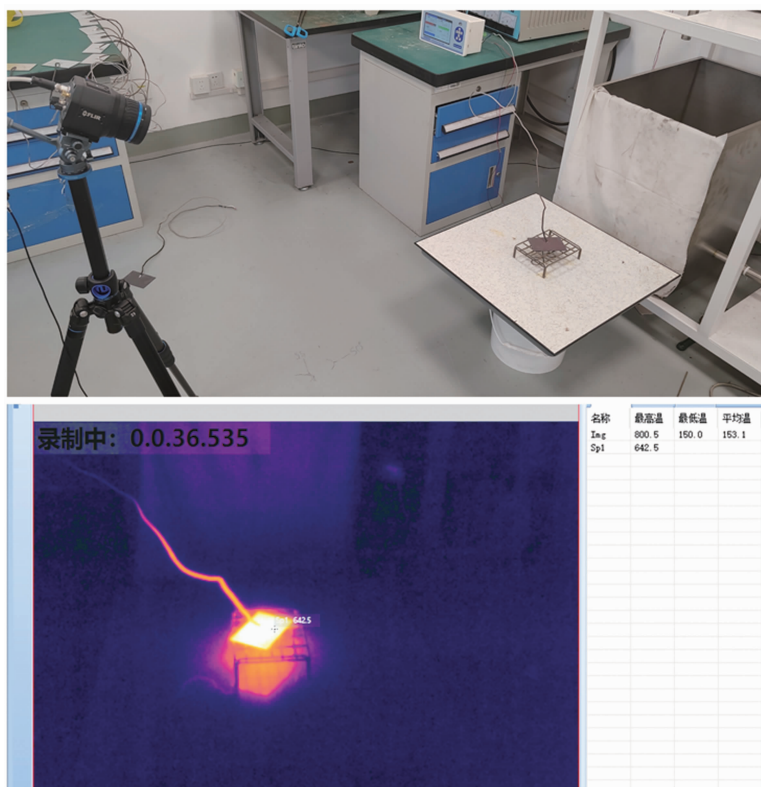


图 3 实验过程图

热像仪的测量角度为  $0 \sim 20^\circ$ , 发射率呈下降趋势, 且下降明显, 对测温结果的影响较大, 因此需要补偿。发射率在  $20^\circ \sim 40^\circ$  时几乎不变, 若可保持热像仪工作在此角度区间内, 则选定固定发射率进行测量也可获取准确的测量结果。热像仪工作在  $40^\circ \sim 80^\circ$  的观测角度时, 发射率呈现明显的波动, 补偿测温结果非常有必要, 如图 4 所示。

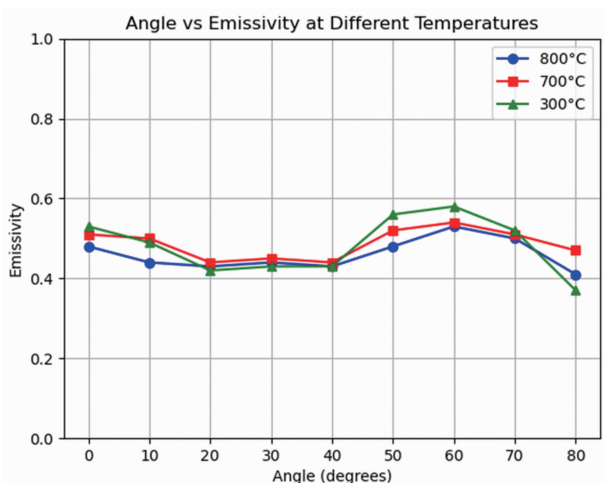


图 4 不同角度对发射率设定值的影响

实验结果显示, 设定发射率并不服从朗伯余弦定律。朗伯余弦定律要求被测面是朗伯面。若被测材料不是朗伯面, 则需要对公式进行改进。另外, 除了物体本身的发射率之外, 热像仪内部的传感器也会对设定发射率产生影响。

### 2.3 板料温度影响实验

对于理想灰体, 其本身的发射率是恒定的, 那么通过修正后的斯特藩-玻尔兹曼定律就可以计算出温度与灰体辐射总功率之间的关系:

$$T = \sqrt[n]{P / \epsilon \sigma A} \quad (2)$$

式中,  $P$  是辐射功率;  $\epsilon$  是物体本身的发射率;  $\sigma$  是斯特藩-玻尔兹曼常数;  $A$  是物体的表面积, 若是单位面积则可省略  $A$ 。文中实验所用热像仪的测温波段是  $7.5 \sim 14 \mu\text{m}$ , 所以取  $n=4$ 。

由于设定发射率受温度的影响并不等同于物体本身的发射率, 需要根据温度对发射率作进一步调整。温度变化的时候, 发射率也会发

生改变。一般认为,非金属材料 and 金属氧化物的发射率较高,并且随着温度的升高而减小;金属的发射率相对较低,但随着温度的升高而增大。当温度升高到一定值后,发射率逐渐趋于稳定,并且不再变化。文中使用的材料表面为铝硅涂层。铝硅涂层在 600 °C 左右会融化,融化后 Fe 和 Al 相互扩散,因此表面有孔洞形成,而且加热至 950 °C 的情况下表面会发生氧化反应(表层为金属氧化物)。

实验发现,在 600~800 °C 区间,发射率随着温度的升高而降低,并呈现趋于平稳的态势。在被测物降温的过程中,红外热像仪的温度示值逐渐高于热电偶的温度。这说明为提高测温的准确性,应逐渐提高设定发射率。在 250~400 °C 区间内,设定发射率有升高的趋势;而在 150~250 °C 区间内,发射率明显下降。在 450 °C 以下时,发射率呈 U 型变化;温度高于 450 °C 时呈现下降趋势。可以通过划分温度段,使用每一个温度段推荐的发射率进行测量,从而提高测量精度,如图 5 所示。

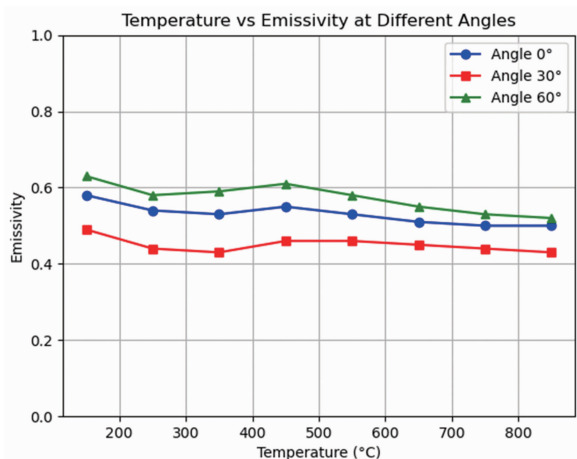


图 5 不同温度对发射率设定值的影响

调整设定发射率,使其尽可能与热电偶温度一致,但其规律与金属氧化物并不完全符合。这是因为厂家在生产过程中会作一定量的补偿,减小温度误差。当观测角度为 10° 时,设定发射率为 0.56,热像仪示值普遍偏低。温度越高,测温误差越大;温度越低,测温误差越小,且中间有一定的波动,如表 2 所示。

表 2 被测物温度对结果的影响

| 红外温度/°C | 热电偶温度/°C | 偏差     |
|---------|----------|--------|
| 678.3   | 843.7    | -19.6% |
| 639.2   | 793.6    | -19.3% |
| 647.5   | 700.1    | -7.1%  |
| 279.5   | 300.0    | -6.8%  |
| 215.3   | 225.2    | -4.4%  |
| 316.6   | 344.8    | -8.1%  |
| 175.1   | 183.1    | -4.4%  |

### 3 计算观测角度

观测角度是指热像仪每个像素点的观测角度。为获取热像仪像素点上的测量角度,首先需要将三维物体投影到热像仪的投影平面上。将三维坐标降维至二维坐标,匹配热像仪的像素坐标,然后再通过向量计算出角度值。

利用投影法可以把空间中的坐标投影到投影平面。从热像仪镜头延伸出的虚线所包围的区域就是热像仪的视场。视场内的物体被投影至投影平面,通过计算获取物体在投影平面的投影区域或投影点,如图 6 所示。

图 6 中有一个工件,将点 A 和镜头相连,把所得到的直线延长,与投影平面相交于点 A',再根据其相对于投影平面内的可视边界的相对位置,可得到该点在热像仪视野中的坐标。

旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$  共同构成热像仪的外参矩阵。利用外参矩阵将物体的三维坐标转换到热像仪坐标系中。它们定义相机在世界坐标系中的位置和方向。旋转矩阵  $R$  描述相机坐标系相对于世界坐标系的方向,平移向量  $T$  表示相机在世界坐标系中的具体位置。热像仪的坐标转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T \quad (3)$$

假设焦距为  $f_x$  和  $f_y$ ,主点为  $(c_x, c_y)$ ,那么热像仪的内参矩阵可以用矩阵  $K$  表示:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

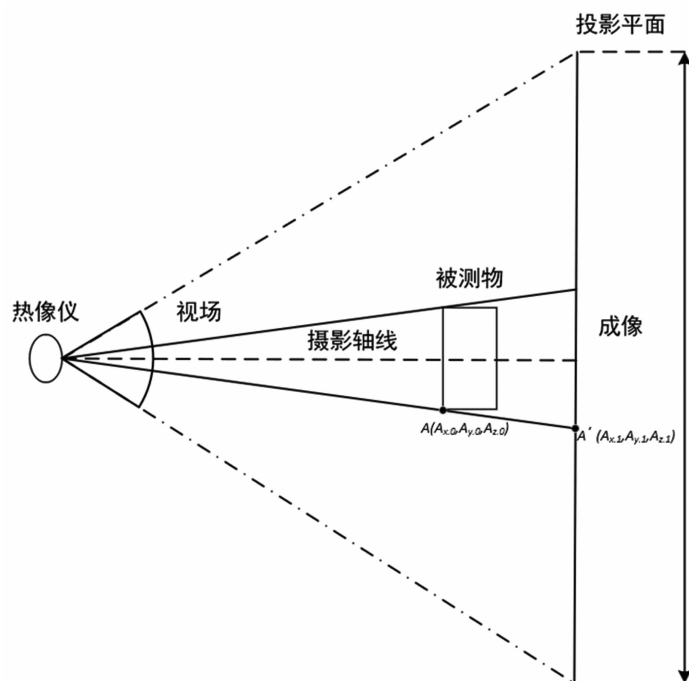


图 6 投影法的基本原理

使用热像仪的内参矩阵可以将热像仪坐标系下的任意点投影至投影平面。假设任意点  $(u, v)$ , 它们的转换关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \times \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y = f(\omega_2 \cdot f(\omega_1 \cdot x + b_1) + b_2) \quad (6)$$

再将投影结果归一化, 最终得到像素坐标:

$$u = f_x \cdot \frac{X_c}{Z_c} + c_x, v = f_y \cdot \frac{Y_c}{Z_c} + c_y \quad (7)$$

计算出各点坐标后即可得到降维后物体在热像仪像素上的坐标。另外还需要获取热像仪各像素点的观测角度。 $N$  是物体表面上某点的法向量,  $D_{norm}$  是热像仪相机光线方向的单位向量, 则它们之间夹角  $\theta$  的关系式如下:

$$\cos\theta = \frac{D_{norm} \cdot N}{|N|} \quad (8)$$

具体点积展开为式(9)。最终通过反余弦得到夹角  $\theta$ , 如式(10)所示。

## 4 补偿模型

### 4.1 建立补偿模型

热像仪常用于无法直接接触测温的场合, 热冲压现场在生产过程中同样不具备接触测温条件。因此, 需要先建立实际温度与设定发射率之间的关系, 并在不同温度区间内使用不同的设定发射率进行测量。例如, 当已知温度位于某一区间时, 可采用该区间设定发射率的中值进行测量。为提高测量精度, 建议尽可能缩小温度区间。然而, 由于真实温度未知, 如果温度区间过短, 其偏差可能会影响设定发射率的选取。

针对测量角度导致的偏差, 可通过投影法降维和空间向量计算确定每个像素的观测角

$$D_{norm} \cdot N = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} N_x + \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} N_y + \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} N_z \quad (9)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \frac{\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} N_x + \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} N_y + \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} N_z}{\sqrt{N_x^2} + \sqrt{N_y^2} + \sqrt{N_z^2}} \right] \quad (10)$$

度,再结合实验结果对角度所引起的偏差进行补偿。而针对被测物自身温度造成的偏差,则可通过划分温度段的方式进行补偿。

本文利用反向传播(Back Propagation, BP)神经网络捕捉输入与输出之间的复杂非线性关系,处理观测角度与温度偏差以及温度段与设定发射率之间的非线性关系。

模型输入观测角度、原设定发射率、热像仪温度示值、热电偶温度,输出新的设定发射率矩阵,并计算新设定发射率下的温度矩阵。

BP神经网络利用误差反向传播,具有较强的非线性映射能力以及柔性网络结构。在输入层输入一组数据后,经过输入层得到一组输出。该输出相对于真值可能存在一定误差,这里可以定义损失函数来描述这种误差。通过反向传播调整神经网络的结构,实现最小损失函数,使得输出更接近真实值。如果有足够多的数据以及合理的超参数设定,那么可以逼近非常复杂的非线性关系。BP神经网络中的输入输出关系如下:

$$y = f(w_2 \cdot f(w_1 \cdot x + b_1) + b_2) \quad (11)$$

式中,  $w_1$  和  $w_2$  分别是第一层和第二层的权重;  $b_1$  和  $b_2$  是偏置项;  $f(\cdot)$  是激活函数,可以选择 sigmoid 函数、tansig 函数或者 ReLU 函数等。文中的隐藏层是双曲正切激活函数 tan-sig。输出层使用线性激活函数 purelin。BP神经网络学习效率慢,且容易陷入局部最优。本文利用余弦退火调节学习率,逐步减小学习率,使模型稳定收敛,避免在训练后期陷入局部最优。BP神经网络训练结果评估中,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为 0.28,平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)为 0.21,  $R^2$  为 0.99。模型训练效果较好,误差呈正态分布(见图 7)。

#### 4.2 模型验证

红外热像仪按照一个发射率拍摄获取被测物体的温度,记录同一时刻热电偶的温度,同时输出经过补偿后的温度。结果显示,经过补偿后的测温结果在高低温度段的精度都有极大

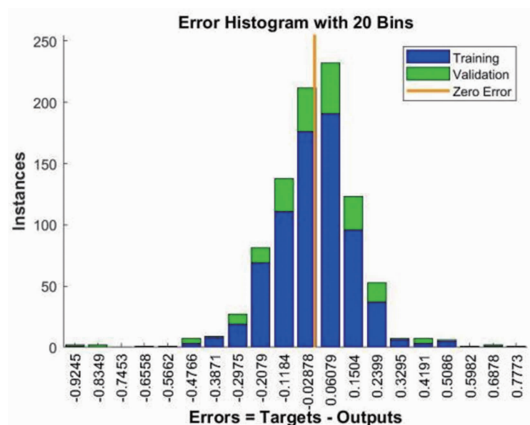


图 7 误差分布图

表 3 补偿温度数据验证

| 原始温度/℃ | 补偿后的温度/℃ | 热电偶温度/℃ | 误差/℃ |
|--------|----------|---------|------|
| 306.9  | 311.8    | 310.7   | 0.9  |
| 301.1  | 294.3    | 294.6   | -0.3 |
| 783.8  | 863.1    | 864.3   | -1.2 |
| 777.5  | 754.3    | 753.3   | 1.0  |
| 616.3  | 601.2    | 601.7   | 0.5  |
| 841.5  | 829.4    | 828.1   | 1.3  |

的提升,温度偏差控制在 $\pm 1.5$ ℃以内;与传统的固定设定发射率测量相比,在 400℃内精度提升 60%,在 600~800℃内精度提升 95%,如表 3 所示。

## 5 结束语

通过系统实验、分析和建模,得到的主要结论如下:

(1)观测角度和被测物体的温度都会对发射率有影响。观测角度对发射率的影响更大,但观测角度在  $20^\circ \sim 40^\circ$  范围内时,发射率几乎不发生变化。

(2)构建融合几何参数与热物理特征的综合补偿模型,突破了传统固定发射率测温的理论局限;测量精度提升了 60%,为智能制造过程的质量监控提供了新的技术手段。

(3)相较于现有单因素补偿研究,本文实现了几何特征与热物理参数的协同建模。通过投影测量与神经网络的优势互补,解决了复杂曲面角度辨识与非线性补偿的技术瓶颈,具有一定的通用性。

(4)为了切合热冲压实际生产,文中实验的加热和保温时间固定,而加热时间差异会导致表面氧化程度变化,进而影响发射率。为了适应更广泛的应用需求,建议后续结合多尺度表面形貌表征技术建立相关联的模型。

### 参考文献

- [1] 张洪,李国和,孙勇,等. SiCp/Al 切削精确测温前红外热像仪发射率标定的实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(6): 169–178.
- [2] 周江平,周媛媛,周学军,等. 基于 BP 神经网络的测量设备无关协议参数预测 [J]. *电子科技大学学报*, 2024, **53**(4): 611–616.
- [3] 王东,刘小虎,路亚旭. 气象条件对红外热像仪作用距离影响分析 [J]. *激光与红外*, 2023, **53**(1): 70–74.
- [4] 李冠霖,范永杰,王正吉,等. 3.2~3.4  $\mu\text{m}$  红外热像仪基于拟合的测温方法 [J]. *激光与红外*, 2024, **54**(1): 92–96.
- [5] 李明超,闫宽,张聪,等. 用于激光软钎焊温度测量的高精度红外辐射测温装置 [J]. *红外技术*, 2025, **47**(1): 108–114.
- [6] 方弘毅,罗捷,王登奎,等. 航空发动机叶片表面红外测温校准及温度场重构 [J]. *红外技术*, 2024, **46**(8): 940–946.
- [7] 张志强,王萍,赵三军,等. 目标距离与角度对红外热成像仪测温精度影响分析 [J]. *天津大学学报*, 2021, **54**(7): 763–770.
- [8] 李天子,刘善军,宋亮,等. 观测角度对岩石热红外光谱解混影响的实验研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, **41**(6): 1769–1774.
- [9] Maturilli A, Helbert J, Ferrari S, et al. Characterization of asteroid analogues by means of emission and reflectance spectroscopy in the 1- to 100- $\mu\text{m}$  spectral range [J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, **68**: 1–11.
- [10] 柯维娜,朱定强,蔡国飙. 金属光谱发射率的仿真与分析 [J]. *航空学报*, 2010, **31**(11): 2139–2145.