

# 红外目标模拟器校准装置构建和校准技术研究

陈振林<sup>1</sup>, 张馨怡<sup>1</sup>, 艾华<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 海军研究院, 北京 100071)

**摘要:** 在对传统红外目标模拟器校准装置分析的基础上, 结合辐射照度校准理论、方法和误差来源三方面, 构建了红外目标模拟器校准装置, 开展了辐照度测量系统内部杂散辐射建模仿真和抑制的研究、红外大气传输修正方法的研究和测试结果数据拟合算法的研究, 分别提出了基于复合蒙特卡洛法的内部杂散辐射数学模型、基于编码器-解码器结构的卷积神经网络红外辐射大气传输校准算法和基于粒子群优化的极限学习机算法, 并在实验室条件下进行了辐照度计量校准实验; 分别验证了在追迹光线数相等的情况下复合蒙特卡洛法的精度更高, 复合蒙特卡洛法标准偏差为  $6.1940 \times 10^{-8}$ , 平均误差为 0.192 93, 且仿真结果体现了红外辐射计各部分杂散辐射对探测器入瞳面接收到的杂散辐射造成的影响; 基于编码器-解码器结构的卷积神经网络算法能够较好的预测大气透过率和大气程辐射, 在 3 个波段下的平均误差为 3.078 3%, 3.818 6%, 5.345 2%, 低于传统方法, 降低了大气透过率和大气程辐射的影响; 通过与 GA-ELM 模型、ELM 模型进行对比, 验证了与传统数据拟合方法相比, 基于 PSO-ELM 的方法在  $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 14 \mu\text{m}$  三个波段下的拟合精度都有所提高, 决定系数分别为 0.992 5、0.991 3、0.981 4, 平均相对误差分别为 0.124 2%、0.715 7%、0.747 1% 有效提高了红外辐射测量准确度。

**关键词:** 红外目标模拟器; 内部杂散辐射; 大气传输; 数据处理

## Study of Calibration Device Construction and Calibration Technology for Infrared Target Simulator

CHEN Zhenlin<sup>1</sup>, ZHANG Xinyi<sup>1</sup>, AI Hua<sup>2</sup>

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Naval Research Institute, Beijing 100071, China)

**Abstract:** Based on the analysis of traditional infrared target simulator calibration devices, infrared target simulator calibration devices are constructed by combining three aspects of radiometric calibration theory, method and error source, the research on the simulation and suppression of internal spurious radiation modeling of the irradiance measurement system is carried out, and the infrared atmospheric transmission correction method and test result data fitting algorithm are developed, a compound Monte Carlo method based on the mathematical model of internal spurious radiation, a calibration algorithm of infrared radiation atmospheric transmission based on the encoder-decoder structure of convolutional neural network, and an algorithm of limit learning machine based on particle swarm optimization are proposed respectively, and the irradiance metrology calibration experiments are carried out under laboratory conditions. It is verified that the accuracy of the compound Monte Carlo method is higher with equal number of tracer lines, and the standard deviation of the compound Monte Carlo method is  $6.1940 \times 10^{-8}$  with a mean error of 0.192 93, and the simulation results reflect that the stray radiation from each part of the infrared radiometer influences on the stray radiation received at the incoming pupil surface of the detector; The convolutional neural network algorithm based on the encoder-decoder structure can predict the atmospheric transmittance and atmospheric range radiation, the average error in three bands is 3.078 3%, 3.818 6%, 5.345 2% respectively, which is lower than the traditional method and reduces the influence of the atmospheric transmittance and atmospheric range radiation; by comparing with GA-ELM model and ELM model, it is verified that compared with the traditional data fitting method, The accuracy of PSO-ELM method is improved in three bands of  $1 \sim 3 \mu\text{m}$ ,  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  and  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ , and the determination coefficients are 0.992 5, 0.991 3 and 0.981 4, respectively, and the average relative errors by 0.124 2%, 0.715 7% and 0.747 1%, respectively, which can effectively improve the accuracy of infrared radiation measurement.

**Keywords:** infrared target simulator; internal stray radiation; atmospheric transmission; data processing

## 0 引言

红外目标模拟器是红外制导导弹的重要检测设备, 通过产生准直光束模拟不同的红外目标, 在实验室环境下对导弹红外导引头的跟踪特性、捕获概率等性能指标进行测试。辐射照度是红外目标模拟器的主要参数, 红外目标模

拟器辐射照度的准确度和稳定性直接影响着导弹红外导引头性能测试效果, 因此需要定期对其进行计量校准。

辐照度的测量一般难以达到很高的准确度, 为了使红外目标模拟器性能达到要求, 很多国家投入力量开展了红外目标模拟器的校准研究工作。如 John L. Grangaard<sup>[1]</sup>采用 12-550 红外辐射计进行测量校准, 但在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  光谱区间

收稿日期: 2022-09-18; 修回日期: 2022-10-26。

作者简介: 陈振林(1966-), 男, 山东平度人, 硕士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事计量技术方向的研究。

引用格式: 陈振林, 张馨怡, 艾华. 红外目标模拟器校准装置构建和校准技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 237-245.

误差很大；美国军方<sup>[2-5]</sup>研制了基于导轨和移动平台的红外目标模拟器校准设备；Robert P. Madding<sup>[6-7]</sup>等人用 SR-5000 红外光谱辐射计和傅里叶光谱辐射计进行校准；苏州大学现代光学技术研究所和西安应用光学研究所<sup>[8-13]</sup>研制了基于精密转台的校准设备，但无法对大型红外目标模拟器进行校准；李旭东<sup>[14]</sup>针对小型红外目标模拟器采用红外傅里叶变换式光谱辐射计进行校准。

本文先构建了基于实验室环境下的红外目标模拟器校准装置，可采用直接测量法或比较测量法对红外目标模拟器辐照度进行计量校准，然后从红外系统内部杂散辐射、红外辐射在大气中传输和测量数据处理方法三方面开展研究，最后利用红外目标模拟器校准装置进行了红外辐射的测量校准，验证了提出方法的有效性。

## 1 校准装置构建

### 1.1 系统工作原理

目前常用的校准方法为比较测量法和直接测量法。比较测量法是在同温度、同波段条件下与标准黑体相比较进行测试，具有准确度高的特点；直接测量法是事先存储了标准数据库，将红外辐照度测量系统直接对准红外目标源进行测试，具有测试简单快捷等特点。根据红外目标模拟器的特点，以尽量减小入射辐照度的光能损失和杂散辐射的影响，并使其在性能和尺寸上能够满足电路部分设计需要为原则，既可以通过转台将准直辐射和被测目标辐射送入辐照度测量系统实现对比测量，也可以单独利用辐照度测量系统进行量值传递。

### 1.2 系统结构组成

红外目标模拟器校准装置主要由红外标准准直辐射源、辐照度测量系统、精密转台、电路系统、测控计算机等部分组成，如图 1 所示，用于红外目标的辐照度等辐射特性的准确测量。

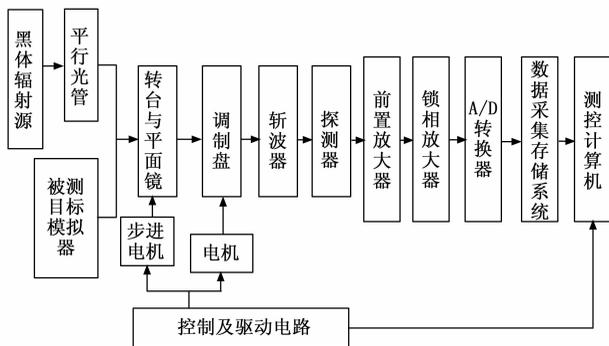


图 1 红外目标模拟器校准系统组成框图

其中，红外辐照度测量系统通过转台平面反射镜分别接收红外标准准直辐射源和被测目标的辐射，实现对辐照度的测量。转台平面反射镜由计算机控制的步进电机驱动，可以交替将红外标准准直辐射源和被测目标的辐射折向红外辐照度测量系统。反射式红外准直光学系统结合腔式黑体，提供已知的红外标准准直辐射，作为校准参考。测控

计算机的作用一是对整个系统进行控制，包括腔式黑体的温度设置、转台平面反射镜的角度设置、辐照度测量系统内部滤光片波段设置等；二是数据采集存储系统传入的数据的处理工作。

### 1.2.1 红外标准准直辐射源

红外标准准直辐射源主要是由黑体辐射源、能量衰减器、光阑、测控计算机、红外准直光学系统等组成，系统结构如图 2 所示。

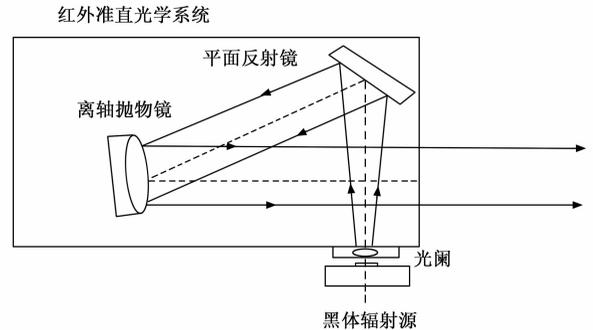


图 2 红外准直辐射源系统组成

红外标准准直辐射源的作用是产生一个能量可变的平行均匀辐射。黑体辐射源采用的是腔式黑体，为调节辐射能量大小，所以在黑体辐射源出射口处放置一个偏振片组合式能量衰减器。红外准直光学系统采用反射式结构，不产生色差，适于多光谱测量，并采用离轴抛物镜对光路进行优化，解决反射式系统中可能面临的中心挡光的问题。

### 1.2.2 辐照度测量系统

辐照度测量系统主要是由三部分组成，分别是红外光学系统、红外探测器和测量电路，系统结构如图 3 所示。辐照度测量系统的作用主要是接收标准准直辐射源和被测目标的辐射从而实现辐照度的测量工作。

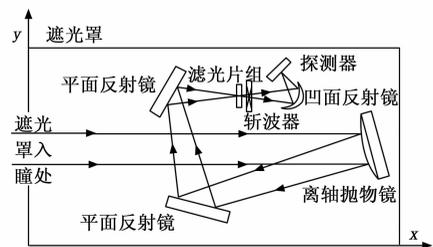


图 3 辐照度测量系统系统结构

红外光学系统进一步改善辐射分布，提高系统信噪比，红外探测器将接收到的辐照度转化为电压并输出，从而完成对红外辐射的测量。辐照度测量系统的光学系统采用的工作方式是被动式测量，利用被测目标自身的红外辐射特性和周围环境之间的差异，测量目标的辐射能量并确定其特性<sup>[15-17]</sup>。红外探测器采用了 J15D14 型号的液氮制冷型 MCT 探测器，是辐照度测量系统的核心元件，探测器可以接收红外辐射，并通过光电转换、电信号处理等方式将接收到的辐射能转变为电信号，从而实现对辐照度的检测，其性能参数很大程度上决定了测量准确度。

## 2 校准技术研究

### 2.1 内部杂散辐射影响研究

杂散辐射是指到达光学系统接收面的非目标辐射能量。对红外光学系统性能具有较大影响, 杂散辐射分析研究是针对所有到达探测器的干扰源。杂散辐射会增加探测器的输出噪声, 降低系统调制函数和信噪比, 直接影响红外辐射测量准确度, 严重时可能比被测目标发出的辐射大几个数量级。因此, 必须抑制杂散辐射。红外光学系统的杂散辐射有两个来源: (1) 外部杂散辐射, 即来自系统外的辐射源所发出的辐射; (2) 内部杂散辐射, 即探测系统内部自身结构直接或通过散射到达探测器接收面的热辐射。

红外光学系统内部不可能时刻处于绝对零度以下, 系统自身结构会向外发出热辐射, 这些热辐射即为内部杂散辐射, 系统所有元件皆可看作是内部杂散辐射的辐射源。

#### 2.1.1 系统建模

辐照度测量系统本身由不透光材料制成的遮光罩覆盖, 阻挡了大部分环境光所造成的外部杂散辐射, 认为探测器接收到的杂散辐射仅来自遮光罩入瞳处及辐射计内部光学元件和机械结构的热辐射。入射辐射通过传输到被探测器接收这个过程中要通过多个光学元件, 来自光学元件的杂散辐射亦可通过光路直接到达探测器靶面。辐照度测量系统内部结构较为复杂, 每个光学元件和机械构件不仅会发出杂散辐射, 当其他杂散辐射到达表面时, 也会进行传递, 形成二次杂散辐射源。简化的辐照度测量系统系统结构如图 3 所示, 探测器及其他元器件在遮光罩内部。

#### 2.1.2 复合蒙特卡洛法

对于内部结构较为复杂的光学系统, 杂散辐射分析需要追踪大量的传输路径, 由于辐照度测量系统内部杂散辐射主要来源为: 遮光罩入瞳处、辐射计内部光学元件和机械结构的热辐射, 且光机系统结构较为复杂, 涉及到多个杂散源。杂散源之间的性质差异较大, 只采用一种蒙特卡洛法的处理结果并不理想。针对不同类型杂散源采取不同的蒙特卡洛法, 对于遮光罩入瞳处, 位置固定, 面积较大, 且来自此处的杂散辐射较为严重, 采用正向蒙特卡洛法; 对于内部光学元件和机械结构, 相对位置关系复杂, 形状差异大, 但探测器入瞳处作为统计面位置固定, 使用反向蒙特卡洛法。

模拟辐射能量传递时, 分离概率模拟和迭代的过程, 认为辐射能束不携带能量<sup>[18-19]</sup>。首先通过概率模拟辐射传输路径, 得到单元之间的辐射传递因子, 然后将辐射传递因子代入能量方程中, 最终得到单元之间的辐射通量。

设发出杂散辐射的微元为  $i$ , 探测器接收面的面元为  $j$ , 则微元  $i$  到入瞳处面元  $j$  的辐射能流密度为:

$$q_{ij} = 4\kappa_i \cdot \sigma T^4 \cdot V_i \cdot RD_{ij} \cdot F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} / S_j \quad (1)$$

$$q_{ij} = \epsilon_i \cdot \sigma T^4 \cdot S_i \cdot RD_{ij} \cdot F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} / S_j = \epsilon_j \cdot \sigma T^4 \cdot RD_{ji} \cdot F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} \quad (2)$$

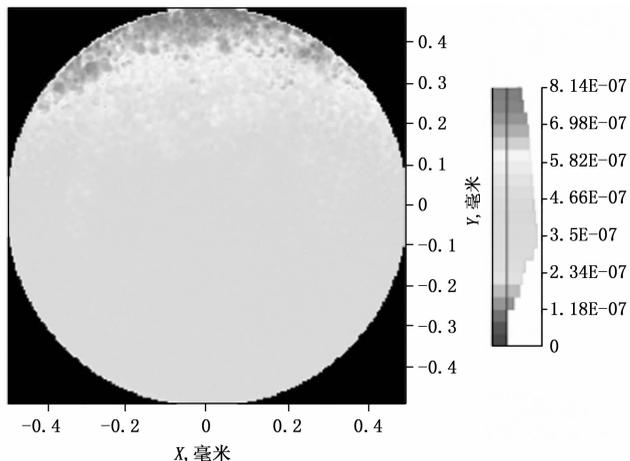
其中:  $\sigma$  为黑体辐射常数,  $\epsilon_i, \epsilon_j$  分别为微元  $i$  和面源  $j$  的发射率,  $F_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$  为波段  $\lambda_1-\lambda_2$  的黑体相对波段辐射力,  $RD_{ij}$ 、

$RD_{ji}$  为单元间辐射传递因子, 分别通过正向蒙特卡洛法和反向蒙特卡洛法得到。

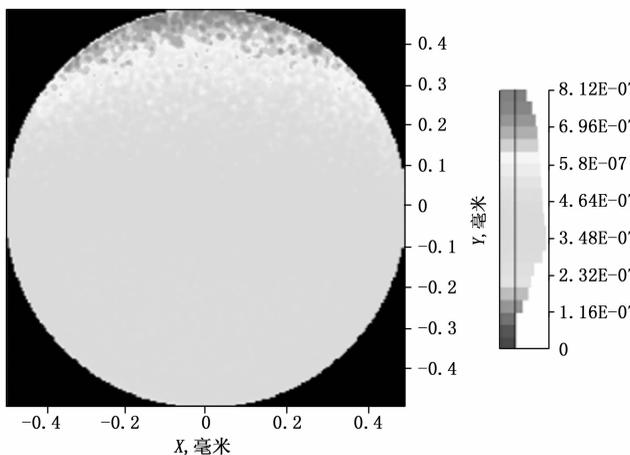
#### 2.1.3 仿真实验与结果分析

为了验证本文方法的有效性, 分别使用两种方法对红外辐射计内部杂散辐射进行分析。一种方法是采用正向蒙特卡洛法进行直接模拟, 即通过直接追踪来对每个微元发出红外辐射通过折射、反射最后在探测器入瞳处平面上被吸收这个过程; 另一种是基于本文中提出的复合蒙特卡洛法模拟, 首先, 根据辐射来源不同分别建模, 并采用不同蒙特卡洛法进行追踪辐射的传输路径。本文采用 LightTools 软件对目标发出辐射波段为  $1\sim 3\ \mu\text{m}$  时的红外辐射计内部杂散辐射进行仿真, 采用的散射模型为朗伯辐射体。

如图 4 (a) 和 (b) 分别为直接模拟和采用本文方法的仿真结果。表 1 给出了两种方法的标准偏差和平均偏差。由仿真结果可知, 复合蒙特卡洛法与直接仿真的追迹光线数和运行时间基本相同, 但精度有所提高。



(a) 直接模拟仿真结果



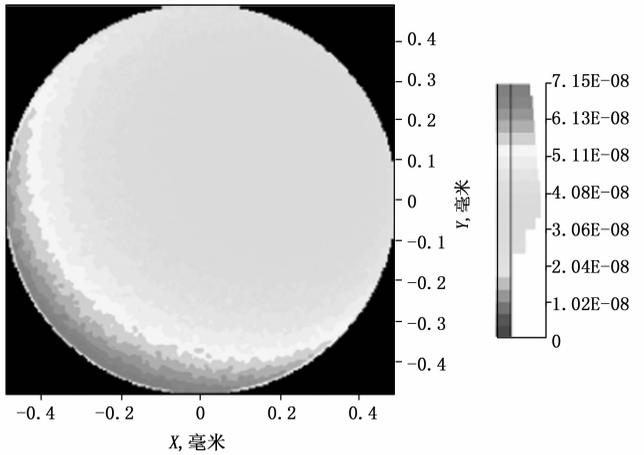
(b) 复合蒙特卡洛法模拟仿真结果

图 4 不同方法仿真结果

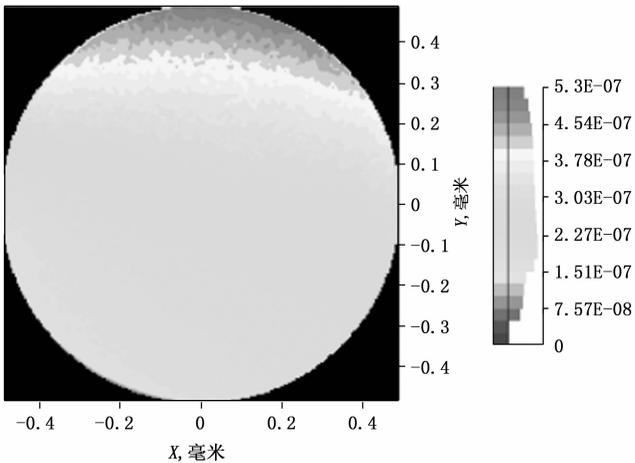
采用本文方法分别对辐射计内部光机元件的热辐射和遮光罩入瞳处发出的杂散辐射进行光线追迹后, 仿真结果如图 5 (a) 和 (b) 所示, 探测器接收面接收的光线数和平均辐照度如表 2 所示。

表 1 两种方法的精度对比

仿真方法	标准偏差	平均偏差
复合蒙特卡洛法	$6.194\ 0 \times 10^{-8}$	0.192 93
直接仿真	$8.370\ 9 \times 10^{-8}$	0.301 84



(a) 辐射计内部光机元件在入瞳面的辐照度



(b) 遮光罩入瞳处在入瞳面的辐照度

图 5 不同位置仿真结果

表 2 复合蒙特卡罗法内部杂散辐射仿真结果

辐射源	光线数	平均辐照度/(W/mm <sup>2</sup> )
内部光机元件	23 422 830	$4.338\ 8 \times 10^{-8}$
遮光罩入瞳处	7 269 384	$2.714\ 7 \times 10^{-7}$

根据对遮光罩入瞳处和辐射计内部光机元件的分析，可以得到系统内杂散源对入瞳面的杂散辐射分布规律，如图 5 (a) 和 (b) 所示，遮光罩入瞳处的杂散辐射对探测器接收面入瞳处贡献较大。造成这种现象的原因可能是，由于遮光罩入瞳处的位置较为特殊成为严重的一次杂散辐射源，且遮光罩整体面积较大，易传递杂散辐射成为二次杂散源。

### 2.2 大气传输影响研究

红外辐射计直接测量目标辐射过程如图 6 所示<sup>[20]</sup>。这个过程主要依靠探测器，但进行直接测量时，受环境等因

素的影响，红外系统接收到的能量与目标发出的辐射能量并不完全一致，实际包括 3 个部分，分别是经过大气衰减后的目标辐射、目标对周围环境的反射辐射、以及探测器和被测目标之间的大气自身辐射<sup>[21-22]</sup>。对辐射大气传输影响较大的参数包括水蒸气含量、二氧化碳含量、臭氧含量、气溶胶浓度、相对高度、方位夹角、能见度。由于目标模拟器校准工作通常在实验室环境下进行，且红外辐射计入瞳处与被测目标方位夹角近似为 0°，所以认为红外辐射在测量过程中是水平均匀传输的。采用基于恒定标准源的宽动态红外辐射测量方法，既不需要预先设置大气模式也不需要提前建立大气辐射传输模型，很大程度上简化了大气修正的过程。除此之外，当红外辐射计和被测目标距离很近时，可以认为大气透过率为 1，但随着二者距离变远，大气参数的影响也就越大，大气透过率越小。

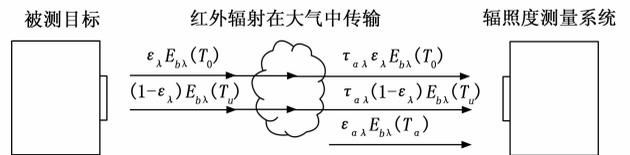


图 6 辐照度测量系统直接测量法测量目标辐射

采用红外辐射计进行直接校准时，探测器将接收到的辐照度转化为电压信号，在一定的辐射范围内，探测器的输入输出特性可以近似为线性的。进而可以得到目标发出的辐照度：

$$E_{ba}(T_0) = \frac{V_i - V_{in} - R \cdot \tau_{at}(1 - \epsilon_a)L_{at}(T_u) - R \cdot L_{at}(T_a)}{k \cdot R \cdot \tau_{at}} \quad (3)$$

#### 2.2.1 编码器—解码器结构的 CNN 算法

编码器—解码器结构的 CNN 算法的网络模型如图 7 所示，CNN 的架构分为 3 个主要模块，包括卷积编码器、embedding 层和卷积解码器。网络由 3 层编码器和 4 层解码器组成。输入的特征向量为探测器输出电压  $V$ ， $(c, T, \lambda)$  为描述  $V$  的特征参数，其中， $c$  是限定维度的常量，这里取 1， $T$  和  $\lambda$  分别代表红外辐射的温度和波段。测试距离  $d$  是直接输入隐藏层中的全连接层中。

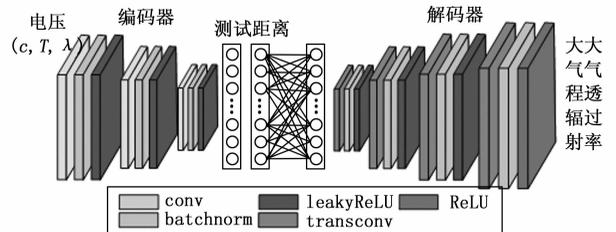


图 7 编码器—解码器结构的卷积神经网络模型

为了提高模型的训练效率，减少输入的空间维度，同时降低对样本训练集大小和计算资源的需求，对编码器进行改进，不采用传统卷积法中的最大值池化，而是采用步进卷积，将输入压缩成一个潜在空间的向量。

在保证模型准确度的前提下，降低模型复杂度，利用编

码器将输入的电压值降维成一个一维向量。然而, 为了纳入辐照度测量系统和被测目标的位置关系, 增加了一个独立的 embedding 层, 在其中处理测试距离。编码器和独立的 embedding 层输出一个向量, 将这个向量作为潜在空间处理的输入。潜在空间包含两个 embedding 层, 每层包含 64 个神经元, 在每一个 embedding 层之后都要进行 LeakyReLU 运算。

理论上, 潜在空间需要将混合代表向量计算为需要的大气透过率和大气程辐射, 所以需要解码器将大气透过率和大气程辐射扩展为可读维度作为输入, 所以采用转置卷积层进行上采样, 对向量升高维度, 4 个转置卷积层的参数如表 1 所列, 在转置卷积层后放置一个批量归一化层和 LeakyReLU 的组合, 防止梯度爆炸。将编码器最后一层的 LeakyReLU 修改为 ReLU, 用于消除输出结果中的负参数。

建立编码器-解码器结构的 CNN 算法模型, 实验过程中 3 个波段下的测试数据经归一化后分批输入编码器进行学习训练, 批尺寸大小设为 8, 测试距离在 embedding 层直接输入, 当前距离下的大气透过率和对应的大气程辐射作为解码器输出, 利用卷积神经网络进行学习训练, 得到测试距离和大气透过率、大气程辐射的模型, 给出两者的对应关系。

测试数据包含 3 个波段的测试数据, 且涉及到的温度点较多, 我们观察到, 随着温度升高, 探测器输出电压也随之增大, 数据分布跨度大, 量纲不统一, 直接放入网络中进行拟合的话, 模型精度会有所降低。对于这种情况有两种处理方式, 一是增加卷积层数量, 数量越多准确率越高, 但这种方法无疑会增加计算负担, 使其更难训练; 另一种方法是对数据进行预处理, 降低输入特征之间的差异, 消除量纲对模型的影响, 减少运算量提高性能。为此, 对

实验数据进行 min-max 归一化处理, 对原始数据线性变换, 将数据缩放到  $[0, 1]$  范围内。

本文提出的基于编码器-解码器结构的 CNN 算法的大气修正训练过程如图 8 所示。在训练阶段利用 Adam 优化器进行网络性能优化, 学习率设为 0.001。

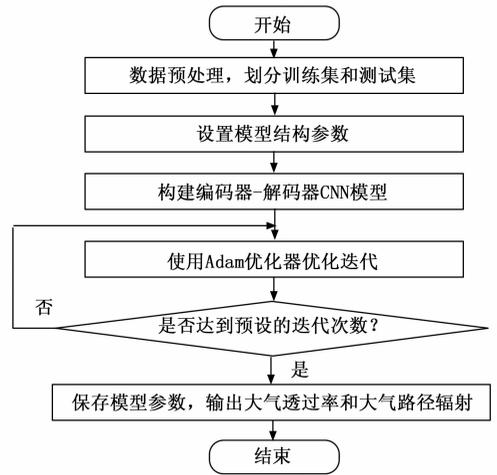


图 8 编码器-解码器结构的 CNN 模型训练流程图

### 2.2.2 仿真实验与结果分析

为了验证分析结果和提出的校准算法, 用实验室构建的辐照度测量系统和标准黑体辐射源进行了辐射测量校准实验, 在测试距离范围 0.5~3 m, 间隔 0.5 m, 得到多组探测器输出电压值, 使用图 7 中所构建的结构对网络进行训练。训练后各距离的大气透过率和大气程辐射的网络输出值如图 9 所示。

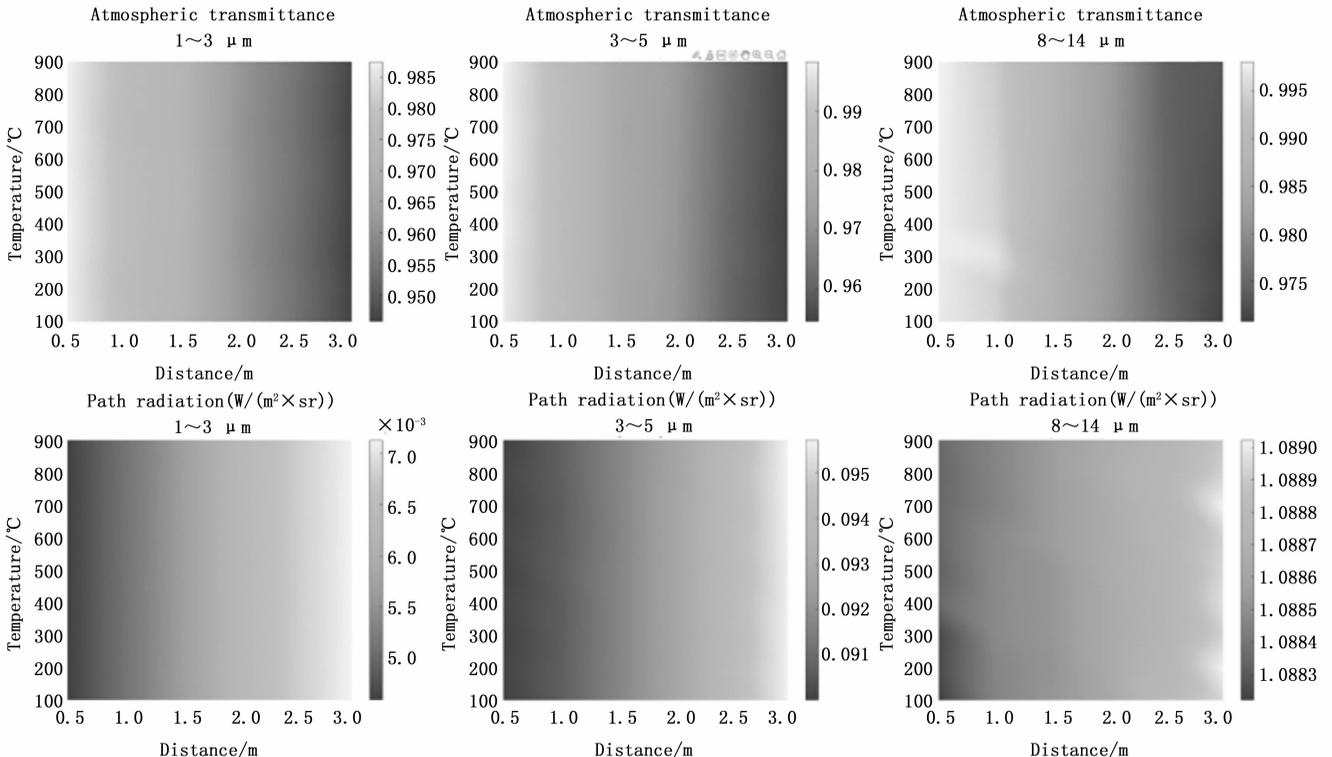


图 9 不同距离下的大气透过率和大气程辐射

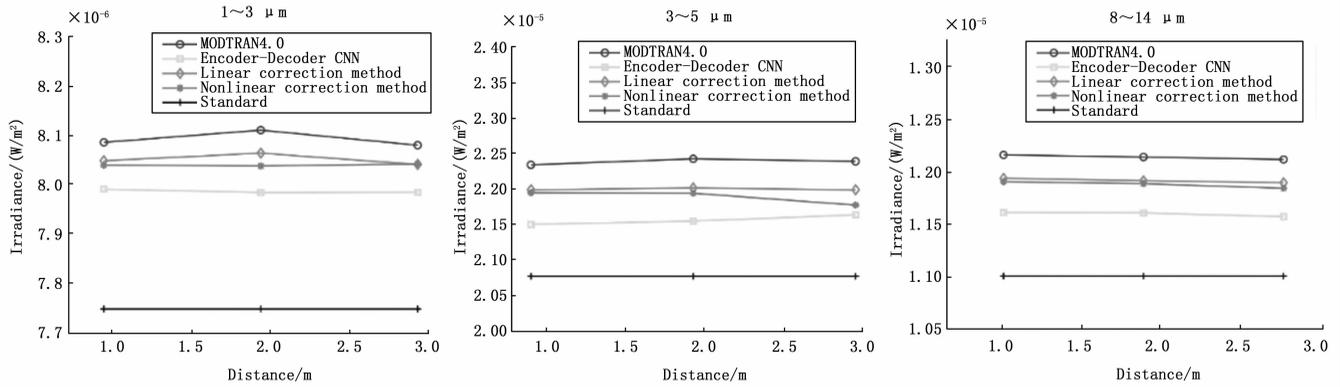


图 10 不同方法辐射反演结果对比

为了验证编码器—解码器结构的 CNN 的大气修正算法提高红外辐射测量准确度，进行辐射反演，设置黑体温度为 500 °C，此时的辐照度理论值和利用 MODTRAN4.0、线性修正方法、非线性修正方法及编码器—解码器结构的 CNN 算法得到的大气透过率和大气程辐射进行辐射反演的结果如图 10 所示，对应的红外辐射测量误差如图 11 所示，具体数值如表 3 所示。

表 3 测量误差

		1~3 μm	3~5 μm	8~14 μm
平均相对误差	MODTRAN4.0	4.440 8%	7.793 0%	9.266 2%
	编码器—解码器结构的 CNN 算法	3.078 3%	3.818 6%	5.345 2%
	线性修正方法	3.912 0%	5.920 4%	8.242 7%
	非线性修正方法	3.767 3%	5.386 6%	7.898 2%
最大相对误差	MODTRAN4.0	4.678 7%	7.985 3%	9.457 6%
	编码器—解码器结构的 CNN 算法	3.133 2%	4.172 2%	5.486 6%
	线性修正方法	4.076 7%	6.006 2%	8.433 5%
	非线性修正方法	3.794 5%	5.675 2%	8.145 1%

从误差曲线可以看出，编码器—解码器结构的 CNN 算法的误差明显小于其他方法，且误差相对稳定，考虑到误差大小可能主要是由算法引起的。当测试距离较小时，MODTRAN4.0 的误差较大，且 MODTRAN4.0 的对于距离的分辨率为 1 m，不适合实验室环境下的近距离测量。线

性修正方法计算结果趋势相同，这种方法认为实验环境为大气分布均匀，仅进行了线性校正；而非线性修正方法需要利用 MODTRAN4.0 模拟数据和实测值进行拟合，在近距离测量时无法获得大量 MODTRAN4.0 数据，样本量小，导致拟合精度较差。

### 2.3 测量数据拟合算法研究

红外目标模拟器辐照度的量值传递是通过红外目标模拟器辐照度测量值和标准直辐射源的标定值拟合实现的<sup>[23]</sup>。测量数据的非线性是影响量值传递可靠性的主要因素。极限学习机 (extreme learning machine, ELM) 具有较高准确度和较好的泛化能力，但由于该算法参数设置往往是通过个人经验和简单调整，难以得到最优拟合精度，所以文中采用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 对 ELM 参数进行优化。

#### 2.3.1 基于粒子群优化的极限学习机算法

基于 PSO-ELM 的红外目标模拟器校准数据拟合流程图，如图 12 所示。

测试数据拟合过程可详细描述如下。

- 1) 将实验所得数据随机划分训练集和测试集，并对样本数据进行归一化预处理；
- 2) 设置 PSO 相关参数，并对粒子速度和位置进行初始化，多个粒子同时移动，共享并调整位置；
- 3) 通过式 (4) 计算训练集的适应度函数值，寻找局部最优解  $p_{best}$  和全局最优解  $g_{best}$ ；

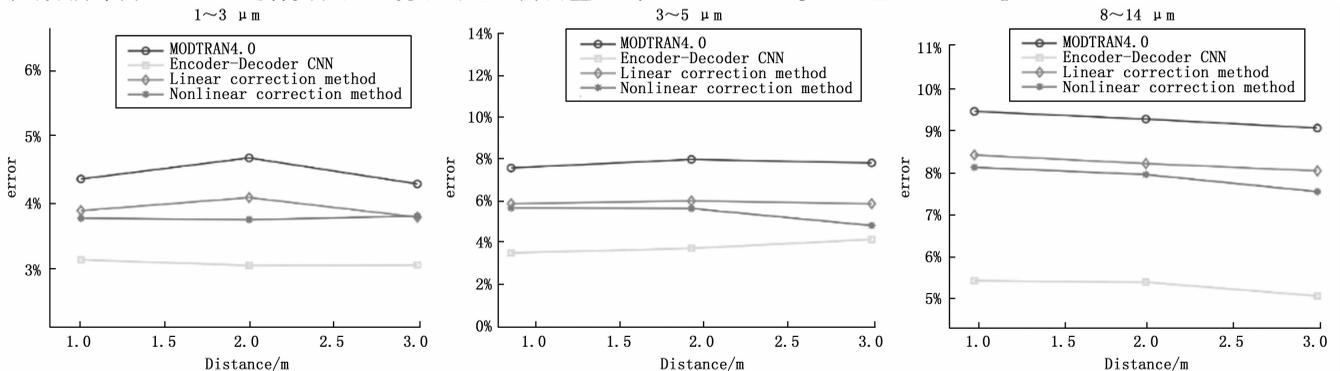


图 11 不同方法的辐射反演结果误差

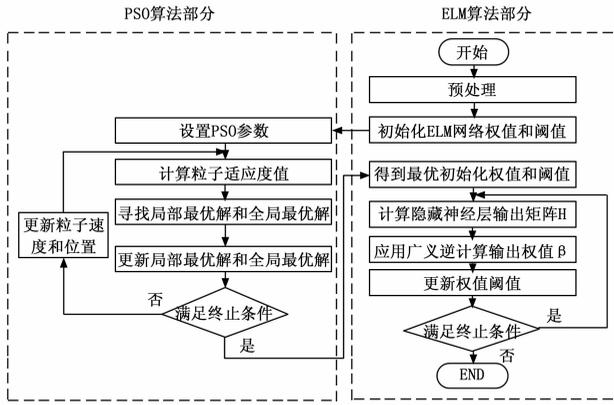


图 12 PSO-ELM 数据处理流程

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

4) 将 PSO 算法的终止条件设为全局最优解满足要求或达到设置迭代次数。若达到终止条件, 则可得到最优 ELM 初始参数; 若未达到终止条件, 则重复步骤 (3), 更新  $p_{best}$ 、 $g_{best}$ ;

5) 将最优 ELM 初始参数带入模型进行训练, 计算隐含层输出矩阵  $H$ ;

6) 利用广义逆矩阵  $H^+$  计算隐含神经元到输出层的权值向量  $\beta$ ;

7) 更新权值和阈值;

8) 将 ELM 算法的终止条件设置为判断当前隐藏节点数与搜索限制的隐藏节点数的大小关系, 若当前隐藏节点数较小, 则继续训练, 重复步骤 (5)、步骤 (6)、步骤 (7); 若当前隐藏节点数较大, 则得到最优模型, 并输出当前拟合结果。

### 2.3.2 仿真实验与结果分析

为了验证 PSO-ELM 算法在红外目标模拟器校准数据拟合方面具有较高应用价值, 以决定系数  $R^2$ 、平均相对误差 MRE 作为评价指标。评价公式如式 (5)、式 (6) 所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $y_i$  为真实值;  $\hat{y}_i$  为预测值;  $\bar{y}$  为真实值的平均值。

将实验所得 96 组数据随机划分 51 组训练集和 45 组测试集, 并对样本数据进行归一化预处理, 分别使用 ELM、GA-ELM 和 PSO-ELM 进行拟合。

PSO 算法设置粒子群规模 20, 最大迭代次数 100, 速度范围为  $[-1, 1]$ , 学习因子设置  $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$  时  $c_1 = c_2 = 2$ ,  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  时  $c_1 = 2.5$ 、 $c_2 = 2$ , 为通过多次测试确定。

GA 算法参数设置个体数目为 20, 最大遗传代数为 100, 变量的二进制位数为 10, 代沟为 0.95, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.01。

采用使用 ELM、GA-ELM 和 PSO-ELM 进行对比实验, 并比较拟合结果, 如图 13、图 14、图 15 所示。

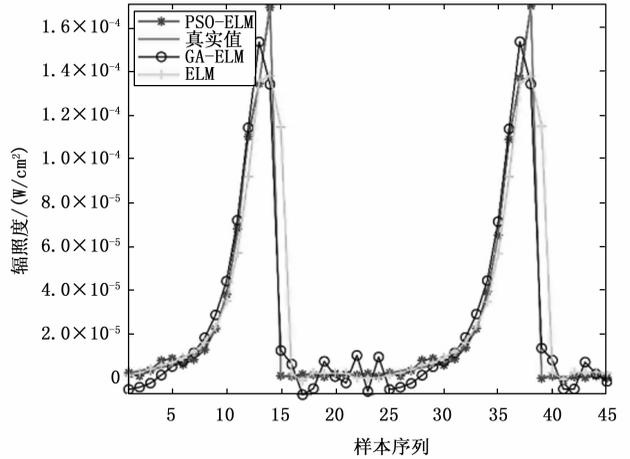


图 13 1~3  $\mu\text{m}$  数据拟合结果

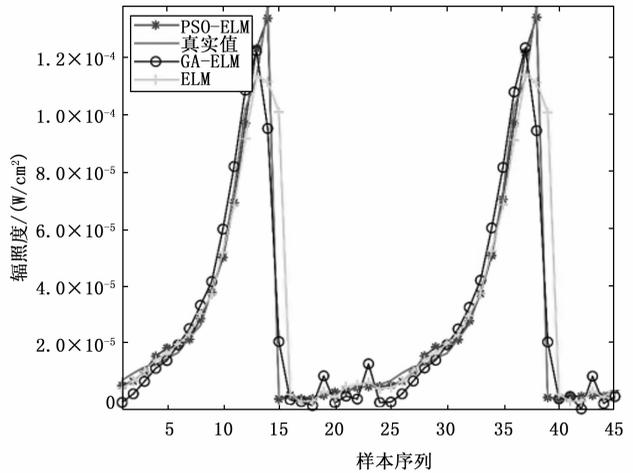


图 14 3~5  $\mu\text{m}$  数据拟合结果

拟合误差分布如图 16、图 17、图 18 所示, 相关的评价指标计算结果如表 3 所示。

表 3 评价指标计算结果

波段	拟合方法	决定系数	平均相对误差/%
1~3 $\mu\text{m}$	ELM	0.721 3	10.266 6
	GA-ELM	0.935 1	0.500 6
	PSO-ELM	0.992 5	0.124 2
3~5 $\mu\text{m}$	ELM	0.705 8	11.299 6
	GA-ELM	0.916 1	1.707 0
	PSO-ELM	0.991 3	0.715 7
8~14 $\mu\text{m}$	ELM	0.566 6	13.721 2
	GA-ELM	0.850 3	8.709 9
	PSO-ELM	0.981 4	0.747 1

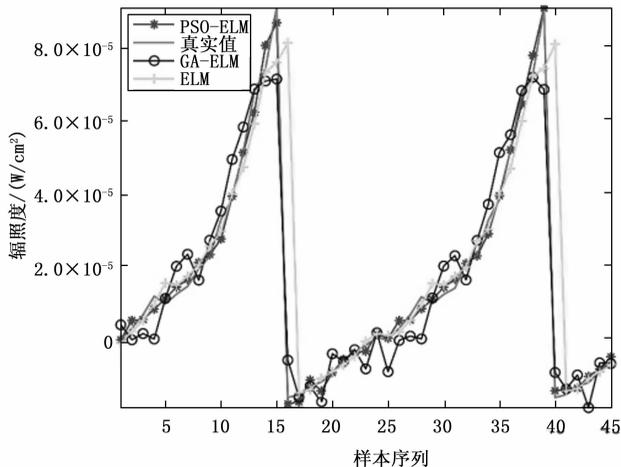


图 15 8~14 μm 数据拟合结果

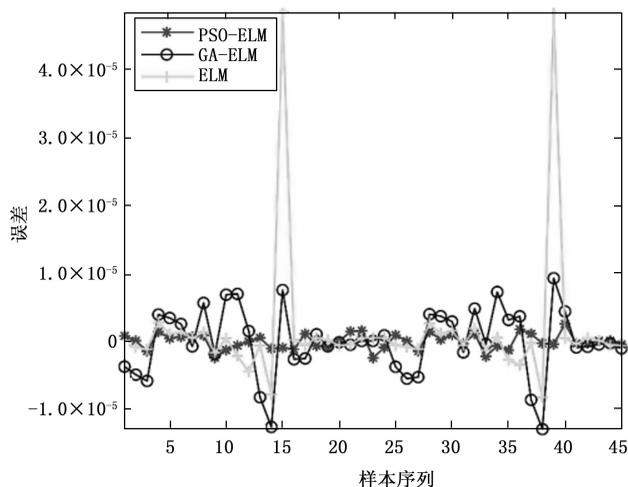


图 18 8~14 μm 数据拟合误差

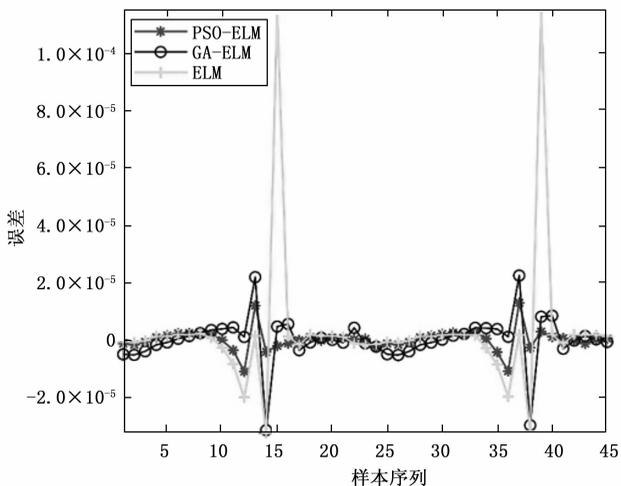


图 16 1~3 μm 数据拟合误差

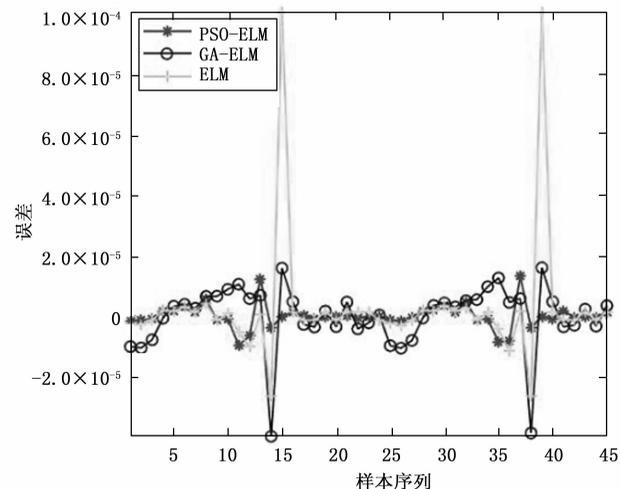


图 17 3~5 μm 数据拟合误差

经过 GA 算法和 PSO 算法优化后的 ELM 的拟合效果明显优于单一的 ELM 算法,证明了优化 ELM 算法的初始参

数可以有效提高拟合精度。但 PSO 算法优化的性能明显优于 GA 算法, GA-ELM 进行拟合时数据出现振荡,可能导致这种现象的原因是算法原理的差异。

如表 3 所示, ELM 在 3 个波段的拟合精度都较低,由于随机产生初始参数,容易出现欠拟合现象; GA-ELM 在中短波红外表现较好,但在长波红外范围内性能下降较为明显,且模型较为复杂,在样本数较少时会发生过拟合现象; PSO-ELM 算法鲁棒性好,在 3 个波段都可以较为准确地拟合红外目标模拟器校准数据,在 1~3 μm、3~5 μm、8~14 μm 三个波段,决定系数分别为 0.992 5、0.991 3、0.981 4,平均相对误差分别为 0.124 2%、0.715 7%、0.747 4%。

通过以上对比,证明了 PSO-ELM 算法数据拟合准确率高于另外两种算法,对红外目标模拟器测量数据非线性处理具有很好的效果。

### 3 结束语

本文构建了红外目标模拟器校准装置的硬件平台,可采用直接测量法或比较测量法对红外目标模拟器辐照度进行计量校准;针对校准误差的主要来源,本文完成的主要工作和结论如下:

1) 针对校准装置内部杂散辐射影响测量准确度的问题,提出了一种基于复合蒙特卡洛法的建模仿真方法。结合发射点位置,建立内部杂散辐射等效数学模型。该等效模型将红外杂散辐射分析分为两个步骤:首先对杂散辐射来源进行分类,分别建立模型表征红外发射特性,然后跟踪红外杂散辐射在等效模型和光学系统之间的传播。实验结果表明,在追迹光线数相同的情况下,采用复合蒙特卡洛法提高了整个杂散辐射分析的准确度。此外,在接收面入瞳处上记录红外杂散辐射辐照度,有助于红外杂散辐射的分析研究和设计有效的红外杂散辐射抑制方案。

2) 针对采用直接测量法大气传输影响的问题,提出了

一种基于编码器—解码器结构的 CNN 大气传输修正算法。在恒定标准源的宽动态红外辐射测量方法的基础上, 利用编码器—解码器结构的 CNN 算法得到大气透过率、大气程辐射与波段、测试距离之间的关系, 针对不同波段、不同测试距离进行大气修正。与传统方法相比, 不需要使用 MODTRAN 软件计算大气透过率、大气程辐射和测量实验环境的大气参数, 改进了近距离测量条件下 MODTRAN 软件距离分辨率低、准确度不高的问题, 提高了红外辐射测量准确度。

3) 针对红外目标模拟器计量校准测量数据的非线性特点, 提出了一种 PSO 优化 ELM 模型随机参数的算法, 解决了 ELM 模型随机参数影响拟合精度的问题。利用 PSO-ELM 模型拟合出标准黑体辐射源温度与探测器测量的辐射照度之间的非线性关系, 并通过仿真实验进行了验证。实验结果表明 PSO-ELM 算法对红外目标模拟器测量数据非线性处理具有很好的效果。

#### 参考文献:

- [1] JOHN L. GRANGARRD. Field Level Calibration of a System of Low Infrared Target Simulators [J]. SPIE, 1989, 1109: 160-168.
- [2] 刘 收, 刘宁敏. 基于棱镜的红外目标模拟器光学系统研究 [J]. 激光与红外, 2016 (11): 1369-1374.
- [3] 常松涛. 红外经纬仪结构设计及提高其辐射测量精度的关键技术研究 [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), 2015.
- [4] 王宗伟, 戴景民, 何小瓦, 等. 超高温 FTIR 光谱发射率测量系统标定方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29 (5): 367-388.
- [5] 关 威, 刘建梅, 王 琦, 等. 基于红外辐射计的物体光谱发射率测量方法 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (11): 163-166.
- [6] JUNG T M, CARTER AC, LORENTZ S R, et al. NIST-BM-DO transfer radiometer (BXR) [J]. SPIE, 2000, 4028: 404-410.
- [7] WICKMAN H A. Development Status of the Cryocooler and Thermal Management System for the Atmospheric Infrared Sounder [J]. SPIE, 1998, 3437: 261-272.
- [8] BUFORD JR J A, MOBLEY S B. US Army Missile Command hardware-in-the-loop infrared projector development [C] // Characterization and Propagation of Sources and Backgrounds. SPIE, 1994, 2223: 112-123.
- [9] BUFORD JR J A, DUNAVANT T S. US Army Missile Command imaging infrared system simulation (IIRSS) [C] // Technologies for Synthetic Environments; Hardware-in-the-Loop Testing. SPIE, 1996, 2741: 69-80.
- [10] COLE JR J S, JOLLY A C. Hardware-in-the-loop simulation at the US Army Missile Command [C] // Technologies for Synthetic Environments; Hardware-in-the-Loop Testing. SPIE, 1996, 2741: 14-19.
- [11] SKALKA M S, GASH W L, MURRER JR R L, et al. Twenty years of hardware-in-the-loop simulation at Eglin Air Force Base, Florida: lessons learned [C] // Technologies for Synthetic Environments; Hardware-in-the-Loop Testing. SPIE, 1996, 2741: 20-32.
- [12] 李 周. 地基靶场红外辐射特性测量系统宽动态辐射测量研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- [13] 曹春芹, 孟卫华, 张晓阳. 红外成像仿真系统的设计与实现 [J]. 红外与激光工程, 2008, 6, 37 (增刊): 401-404.
- [14] 李旭东, 冯爱国, 周新妮, 等. 外场用红外目标模拟器辐射特性测量研究 [J]. 应用光学, 2010, 31 (2): 252-255.
- [15] ZHOU H C, HAN S D, SHENG F, et al. Visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale furnace via regularized reconstruction from radiative energy images: numerical studies [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2002, 72 (4): 361-383.
- [16] SPURR R J D. A new approach to the retrieval of surface properties from earthshine measurements [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 83 (1): 15-46.
- [17] VITKIN E, ZHDANOVICH O, TAMANOVICH V, et al. Determination of the temperature and concentrations for the products of combustion of a hydrocarbon fuel on the basis of their infrared self-radiation [J]. International journal of heat and mass transfer, 2002, 45 (9): 1983-1991.
- [18] 谈和平. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [19] 王丹丹. 辐射传热蒙特卡洛法计算精度的精确评价及数值试验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [20] 张馨怡, 陈振林. 一种红外目标模拟器的大气传输校准方法研究 [J/OL]. 红外与激光工程: 1-11 [2022-09-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20220907.1527.002.html>
- [21] TARDY B, RIVALLAND V, HUC M, et al. A software tool for atmospheric correction and surface temperature estimation of Landsat infrared thermal data [J]. Remote Sensing, 2016, 8 (9): 696.
- [22] DUMOULIN J, BOUCHER V. Infrared thermography system for transport infrastructures survey with inline local atmospheric parameter measurements and offline model for radiation attenuation evaluations [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8 (1): 084978.
- [23] 张馨怡, 陈振林. 基于 PSO-ELM 算法的红外目标模拟器校准数据拟合方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (7): 207-212, 218.