



双向反射分布函数结合Bi-LSTM网络求解壁面发射率

傅莉 樊金浩 张兆义 张磊

Wall emissivity solved by bidirectional reflection distribution function combined with Bi-LSTM network

Fu Li, Fan Jinhao, Zhang Zhaoyi, Zhang Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220355>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

舰船湍流尾迹红外发射率计算方法

A method for calculating IR emissivity of ship turbulent trailing wake

红外与激光工程. 2018, 47(5): 504003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0504003>

低发射率材料涂敷区域对排气系统壁温和红外特性的影响

Effects of low emissivity material coating site on wall temperature and infrared characteristics of exhaust system

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20190131 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190131>

毫米波迷彩隐身涂层发射率分布数值计算

Numerical calculation of millimeter wave pattern painting stealthy coat emissivity

红外与激光工程. 2017, 46(3): 321002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0321002>

热像仪对QFN封装表面发射率环境透射率的标定

Surface emissivity and the environment transmittance calibration for QFN package with thermal imager

红外与激光工程. 2017, 46(9): 917004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0917004>

双向反射分布函数测量装置设计及指向精度分析

BRDF measuring device design and pointing accuracy analysis

红外与激光工程. 2019, 48(5): 517003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0517003>

定标漫反射板实验室系统级BRDF测量方法

In-lab system-level BRDF measurement method of calibration diffuser

红外与激光工程. 2017, 46(1): 117004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0117004>

双向反射分布函数结合 Bi-LSTM 网络求解壁面发射率

傅 莉¹, 樊金浩¹, 张兆义¹, 张 磊²

(1. 沈阳航空航天大学 自动化学院, 辽宁 沈阳 110136;

2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 壁面光谱发射率求解是飞行器红外隐身的关键技术之一。首先设计了壁面反射光路和光源, 通过光谱辐射计获取壁面反射的辐射亮度序列, 为尽可能地消除外界干扰对于光谱发射率求解精度的影响, 基于双向长短期记忆网络, 设计了 Bi-LSTM 亮度回归网络模型, 并对测试样本进行训练学习。基于 BRDF 的壁面发射率求解模型及基于 Bi-LSTM 网络的亮度回归模型求解壁面的发射率。计算结果显示, 提出的基于双向反射分布函数的壁面发射率求解方法的相对误差为 12.21%, 满足工程测试需求。

关键词: 光谱发射率; 辐射亮度; LSTM 网络; BRDF

中图分类号: TN219 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220355

Wall emissivity solved by bidirectional reflection distribution function combined with Bi-LSTM network

Fu Li¹, Fan Jinhao¹, Zhang Zhaoyi¹, Zhang Lei²

(1. School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Shenyang Aircraft Design Research Institute, Shenyang 110136, China)

Abstract: Wall spectral emissivity solution is one of the key techniques for infrared stealth of aircraft. Firstly, the wall reflected light path and light source were designed, and the brightness sequence of wall reflected radiation was obtained by spectral radiometer. In order to eliminate the influence of external interference on the solving accuracy of spectral emissivity as much as possible, Bi-LSTM brightness regression network model was designed based on bidirectional LSTM network, and the test samples were trained and learned. The wall emissivity solution model based on BRDF and the luminance regression model based on Bi-LSTM network were used to solve the wall emissivity. The calculation results show that the relative error of the proposed wall emissivity solution method based on BRDF is 12.21%, which meets the requirements of engineering test.

Key words: spectral emissivity; radiance; LSTM network; BRDF

收稿日期: 2022-05-25; 修订日期: 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61074090)

作者简介: 傅莉, 女, 教授, 博士, 主要从事模式识别与智能系统、飞行器隐身测试方面的研究。

0 引言

红外发射率是目标红外辐射特征的重要组成部分之一,相关研究在军民领域都有广泛的应用^[1-3]。在国防及军事领域中,各种装备的红外制导、红外跟踪和红外隐身等功能已经成为武器装备在战场生存和打击的重要指标,对战场形势有主导作用,这些相关武器装备、材料和器件的研发都要配备精确的红外辐射特征测试作为引导和支撑^[4-6]。

根据材料的热辐射特性在不同的方向上不相同这一特点,将发射率按发射方向可以分为半球方向上的半球发射率以及与热辐射体表面法线方向呈 θ 角度处小立体角内的方向发射率,当 θ 为零时,该方向发射率也称为法向发射率。根据测量原理的不同,发射率测量方法又可分成两大类:直接法测量和间接法测量。采用直接法测量发射率涉及到加热环节,而高温作用下,涂层容易产生损伤^[7]。采用积分球反射测量发射率可以解决在常温和中低温测量中遇到的难题,并且突破了测量超低发射率材料的技术瓶颈,实验操作简单,是目前比较常用的间接测量方法^[8]。但是,对于待测样品的测试受积分球设计大小的限制,样品过大则难以实现测试。而方向发射率测量方法多样,便于在工程中实现,故目前研究内容和实验应用较多的是针对方向发射率的测量方式^[9]。

1 基于双向反射分布函数的发射率求解模型

由于壁面样品受光面涂有低发射率涂层,涂层涂覆效果是遍布细小颗粒的磨砂质感,因此入射光束照射到样品表面时会发生漫反射式的散射。双向反射分布函数能够对材料表面的散射特性进行详细的描述,并且还能对材料光辐射特性等特征进行描述,基本上能够反映除几何特征外的全部光学特性^[10]。

1.1 双向反射分布函数

双向反射分布函数 (Bidirectional Reflection Distribution Function, BRDF) 最早由美国学者 Nicodemus 提出^[11],是关于电磁波入射角、反射角及波长的函数,单位为 sr^{-1} 。可以比较精确地反映不同入射角与观测角度、不同波长、不同表面粗糙度的目标表面的反射特征,其几何定义如图 1 所示。

BRDF 定义当一束光均匀投射到足够大的均匀

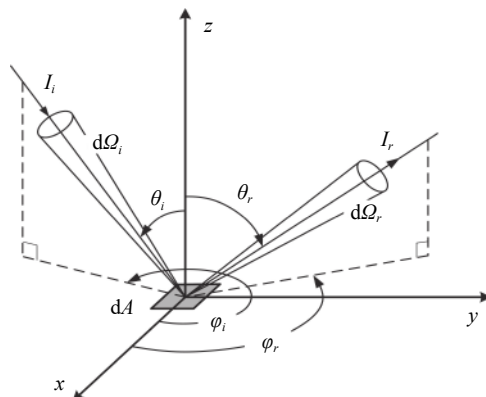


图 1 双向反射分布函数几何定义

Fig.1 Geometric definition of bidirectional reflection distribution function

且各项同性的材料表面上,材料表面的反射辐亮度与入射辐照度的比值,其数学表达式为:

$$f_i(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (1)$$

式中: θ_i, φ_i 为入射天顶角和方位角; θ_r, φ_r 为出射天顶角和方位角; λ 为波长; dL 为面元经光源照射后在 (θ_r, φ_r) 方向上反射的光谱辐射亮度,单位 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; dE 为 (θ_i, φ_i) 方向上的入射光在材料表面产生的光谱辐射照度,单位 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

1.2 基于 BRDF 的壁面发射率求解模型

辐射体的辐射出射度与同温度下黑体的辐射出射度之比称为半球发射率,分别为全量和光谱量两种。基于黑体全辐射出射度定义式,半球全发射率定义为:

$$\varepsilon_h(T) = \frac{M(T)}{M_{bb}(T)} \quad (2)$$

式中: $M(T)$ 为实际物体在温度 T 的全辐射出射度; $M_{bb}(T)$ 为黑体在相同温度下的全辐射出射度。

半球光谱发射率定义为:

$$\varepsilon_{\lambda h}(T) = \frac{M_{\lambda}(T)}{M_{\lambda bb}(T)} \quad (3)$$

式中: $M_{\lambda}(T)$ 是实际物体在温度 T 的光谱辐射出射度; $M_{\lambda bb}(T)$ 为黑体在相同温度下的光谱辐射出射度。

根据辐射亮度定义式,通过对立体角积分可以得到 dA 向半球空间中发射的辐射功率,即:

$$dP = \int_{\text{半球空间}} d^2P = \left[\int_{2\pi\text{球面度}} L \cos\theta d\Omega \right] dA \quad (4)$$

根据辐射出射度的定义——单位面积的辐射功率,可以得到 L 与 M 的关系式为:

$$M = \frac{dP}{dA} = \int_{2\pi\text{球面度}} L \cos\theta d\Omega \quad (5)$$

壁面样品在接受垂直入射光照射时,散射能量会向表平面法线方向的整个半球空间内发散。如图 2 所示,规定样品表平面为 xoy 面,入射光沿 z 轴负方向照射表平面,当观测天顶角 θ 一定时,认为反射光在不同观测方位角 θ 方向上具有各向同性。

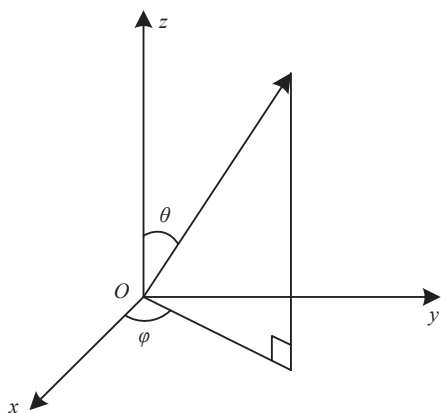


图 2 观测方向空间角定义

Fig.2 Space angle definition of observation direction

根据基尔霍夫定律,对于不透明的物体,透射率为零,则 $\varepsilon = 1 - \rho$, 其中 ρ 为物体的反射率。对于非镜面反射的固体壁面,可设一方向反射率函数 $\rho(\theta)$ 表示其在某一方向 θ 上对法线方向入射辐射的反射能力。类似地,对于表面粗糙的均匀反射源, dA 向半球空间中反射的辐射功率 P_r 与立体角 Ω 存在如下关系:

$$dP_r = \left[\int_{2\pi\text{球面度}} L_{in}\rho(\theta)d\Omega \right] dA \quad (6)$$

式中: L_{in} 为入射辐射的辐射亮度; $L_{in}\rho(\theta)$ 即为各 θ 方向上反射的辐射亮度 $L_r(\theta)$, $L_r(\theta)$ 可由傅里叶光谱辐射计观测得到。反射的总辐射出射度即为:

$$M_r = \frac{dP_r}{dA} = \int_{2\pi\text{球面度}} L_{in}\rho(\theta)d\Omega = \int_{\varphi} \int_{\theta} L_r(\theta) \sin\theta d\varphi d\theta \quad (7)$$

类比发射率定义,对于一个漫反射源,其反射率为反射的总辐射出射度 M_r 与入射的总辐射照度 E_{in} 的

比值,即:

$$\rho = \frac{M_r}{E_{in}} \quad (8)$$

当用黑体光源对反射源进行照射时,其辐射照度 E_{in} 就是黑体的出射度 M_{bb} , 于是可得反射率计算公式为:

$$\rho = \frac{M_r}{M_{bb}} = \frac{\int_{\varphi} \int_{\theta} L_r(\theta) \sin\theta d\varphi d\theta}{M_{bb}} \quad (9)$$

光源垂直入射壁面的反射亮度包线如图 3 所示。由于在实际测量实验中难以对各 θ 方向上的辐射亮度 $L_r(\theta)$ 进行连续观测,故可将半球空间依 θ 角方向分为 n 份, θ_k 为各份的中心角度, θ_{k1} 和 θ_{k2} 分别为各份的下限和上限。

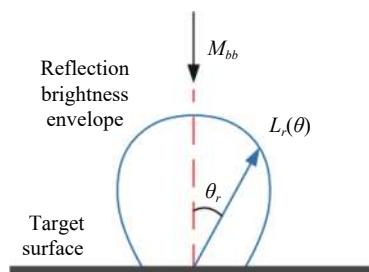


图 3 光源垂直入射壁面的反射亮度包线

Fig.3 Reflectance envelope of light source perpendicular to wall surface

获得反射率计算公式的离散形式:

$$\rho = \frac{M_r}{M_{bb}} = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{\varphi} \int_{\theta_{k1}}^{\theta_{k2}} L_r(\theta_k) \sin\theta d\varphi d\theta}{M_{bb}} \quad (10)$$

结合测试环境温度所得环境亮度 L_g 和出射度 M_g , 反射率可进一步表示为:

$$\rho = \frac{M_r}{M_{bb}} = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{\varphi} \int_{\theta_{k1}}^{\theta_{k2}} (L_r(\theta_k) - L_g) \sin\theta d\varphi d\theta}{M_{bb} - M_g} \quad (11)$$

最终,待测红外目标的发射率即为:

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (12)$$

2 壁面反射亮度测量实验系统设计

基于 BRDF 测量原理及散射测量相关技术求解壁面发射率,需进行精确的壁面反射亮度测量实验。考虑到要测量的对象为微弱的反射光信号,在壁面反射亮度测量实验设计时,须通过对背景的散射杂光进

行抑制来提高所测光束质量,避免环境对系统测量精度产生影响。

2.1 壁面反射亮度测量实验系统总体设计

在壁面反射亮度测量系统中,为获得稳定、均匀的入射光束,由黑体面源作为光源发出红外辐射光束,经束光筒聚光、斩波器调制后,形成以特定频率周期变化的平行光信号垂直入射壁面样品表面。

壁面反射亮度测量系统组成框图如图 4 所示。

光信号经壁面反射后进入傅里叶光谱辐射计的光学系统,光学系统会对视场中的红外光进行收集和分光,经传感器转变为电信号进入前置放大和锁相放大的环节。其中锁相放大器可以筛选出经过调制、具有特定频率的黑体辐射光信号进行锁相放大,以此来抑制环境散射杂光,提高测量信噪比。放大后的电信号由 A/D 转换器转变为数字信号,经信号处理后传入上位机。

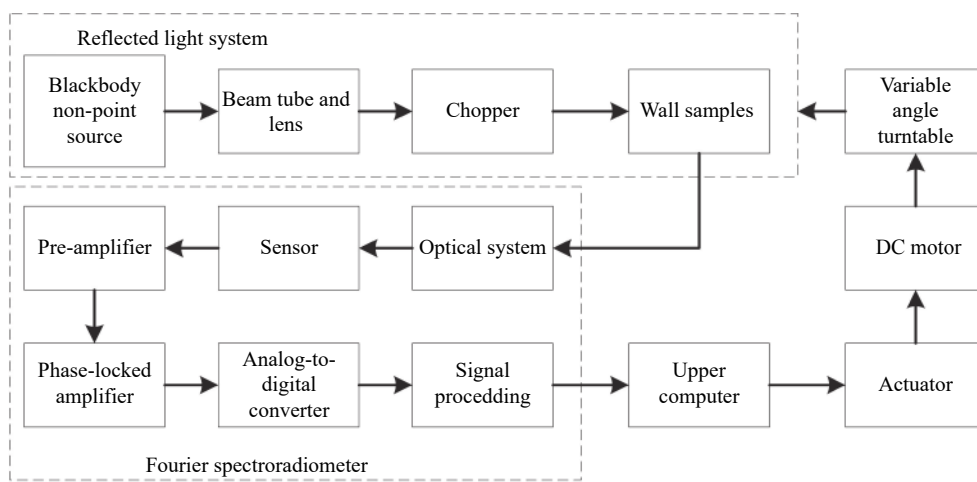


图 4 壁面反射亮度测量系统组成框图

Fig.4 Block diagram of wall reflection brightness measurement system

2.2 壁面反射光源设计

光路设计是壁面反射亮度测量实验设计中的一个重要环节,对系统测量实验的精确性具有直接影响。由于光谱辐射计是对空间一定范围内射入光学镜头的光进行测量,就势必会存在背景光、散射光等一些杂光产生的光噪声。所以从光路方面对要测量的光束进行一些遮挡或调制,具有从源头消除各种杂散光和噪声的好处,可以起到提升测量精准度的作用。

实验所用的黑体辐射源朗伯辐射体,在温度和位置一定的情况下,发射出的光束在半球空间内各个方

向上亮度比较接近,系统的反射光测量精准度会因为入射光强的不集中而产生一定的影响。

故而本壁面反射亮度测量系统需要用束光筒对黑体面源发出的红外辐射光束进行聚光处理,获得近似高斯光束分布的、光强集中在光轴附近一定发散角的入射光束,再经凸透镜使光束汇聚成为一定大小尺寸的平行光,光束整形示意图如图 5 所示。该光束整形的操作可以使得入射到壁面样品的光束具有相对均匀的光强及大小合适的光斑,对提高后续信号处理效果和测量精准度有好处。

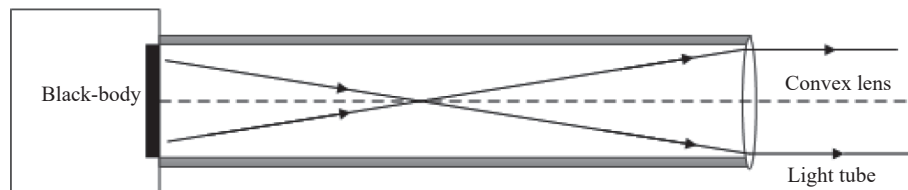


图 5 光束整形

Fig.5 Beam shaping

经过整形后的光束汇聚了黑体面源发出的几乎所有辐射强度,而在光束中心、与黑体面源面积等大的圆形垂直截面内,则集中了超过 89% 的黑体辐射强度。当整形光束垂直照射到壁面样品上时会形成与黑体面源面积大小相近的圆形高亮光斑,可以认为在光斑区域内的辐射照度与黑体面源的出射度相同。因此,在进行发射率求解计算时,反射源接收的辐射照度 E_r 就能够用黑体面源的出射度 M_{bb} 代入。

2.3 壁面反射亮度光路设计

被黑体辐射照射的壁面样品会将辐射能量反射

到表平面法线方向的整个半球空间,将壁面垂直于地面放置,即可在水平方向上,用傅里叶光谱辐射计测量壁面不同天顶角方向的反射辐射亮度。使用傅里叶光谱辐射计测量反射亮度的光路如图 6 所示。调整壁面表平面法线与壁面—傅里叶光谱辐射计连线之间的夹角,就可以实现观测方向的改变。壁面反射出的光线夹杂着杂光噪声通过傅里叶光谱辐射计的镜头光孔进入光学系统,光学系统包括聚光镜头和迈克尔逊干涉仪两大部分。

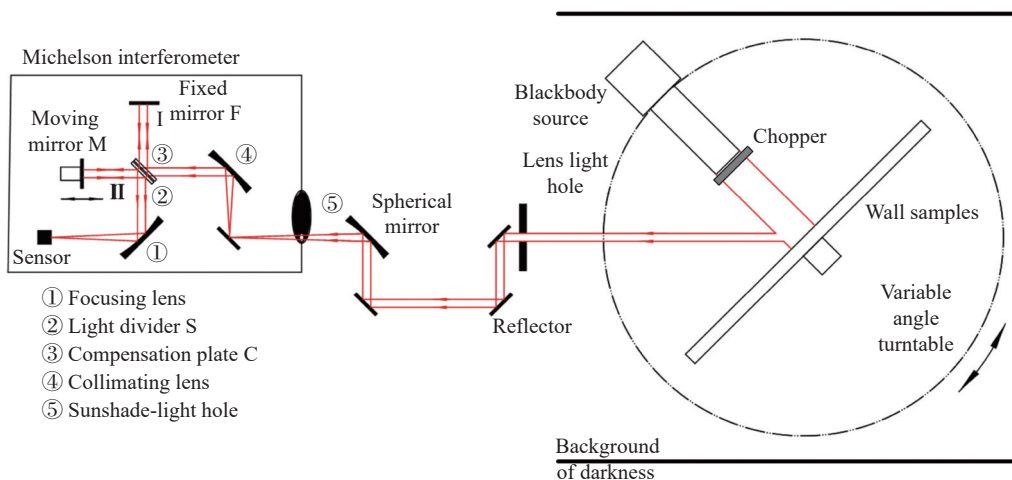


图 6 壁面反射亮度光路示意图

Fig.6 Schematic diagram of wall reflection brightness light path

聚光镜头通过三面反射镜和一面聚光球面镜的反射,配合遮光器上适宜大小的通光孔,可以在不改变原本光线传播方向的情况下,将镜头捕获到的平行反射光汇聚到聚光球面镜的焦点上,从而可以提高进入后续环节光线的信噪比,进一步削弱杂光噪声对测量结果产生的影响。

迈克尔逊干涉仪入射窗口内有一反射镜,该反射镜位于聚光镜头球面镜的焦点位置,将进入干涉仪暗箱内的光线反射到准直透镜上,使得光线重新变为平行光。经过准直后的平行光被分光板 S 分成反射光线 I 和透射光线 II。其中,光线 I 通过补偿板 C 照射到定镜 F,反射后再次穿过补偿板 C 和分光板 S,被聚焦透镜汇聚到传感器上;同时,光线 II 被动镜 M 反射,原路返回分光板 S 后被半透膜反射向聚焦透镜,并到达传感器。

3 双向长短期记忆亮度回归网络模型设计

根据傅里叶光谱辐射计测量光谱辐射的原理可知,傅里叶变换获得的亮度曲线本身就具有明显的震荡噪声,加之测试时的复杂外界因素,由辐射计直接生成的辐射亮度序列需要尽可能消除外界因素造成的干扰才能进行发射率的准确求解。

影响测量壁面发射率的因素有很多,比如:壁面本身的材料性质(粗糙程度、表面温度、几何形状等)、观测方向、测量波长、大气透过率、背景辐射等,并且在红外辐射特性建模过程中各种变量之间的关系难以确定。采用人工神经网络模型可以有效降低其他因素对目标红外辐射亮度测量的影响,提高光谱发射率的估算精度^[12-14]。因此,文中采用了人工神经网络模型对壁面红外辐射亮度进行回归预测建模。

3.1 双向长短期记忆网络

双向长短期记忆 (Bidirectional Long Short Term Memory, Bi-LSTM) 网络由长短期记忆 (LSTM) 网络改进而来, LSTM 使循环神经网络 (RNN) 在捕获长期依赖性方面获得了改进, 克服了梯度消失和梯度爆炸的问题。RNN 结构如图 7 所示。在 LSTM 中, 每个传统 RNN 隐含层节点都被存储器单元替换, 这个重要结构使网络成功避免了梯度消失和爆炸。LSTM 存储器单元节点由其包含的四个门单元组成, 如图 8 所示。

图 8 中, C_t 表示当前细胞的状态, C_{t-1} 表示前一时

时刻细胞的输出, X_t 为当前新输入的信息, X_{t-1} 为前一时

$$f_{gt} = \text{Sig}(W_{fg} \cdot [X_t, H_{t-1}] + b_f) \quad (13)$$

式中: Sig 为逻辑 S(Sigmoid) 形函数; W 为每个输入的单

独权重向量; b 为偏置矢量。
 下一步是输入门决定有多少新信息可以加入到当前的细胞状态中, 完成这一过程需要首先通过输入门激活函数 i_t 判断哪些信息需要更新, 然后再经过 tanh 层生成备选更新的信息, 两者相乘得到新进入的

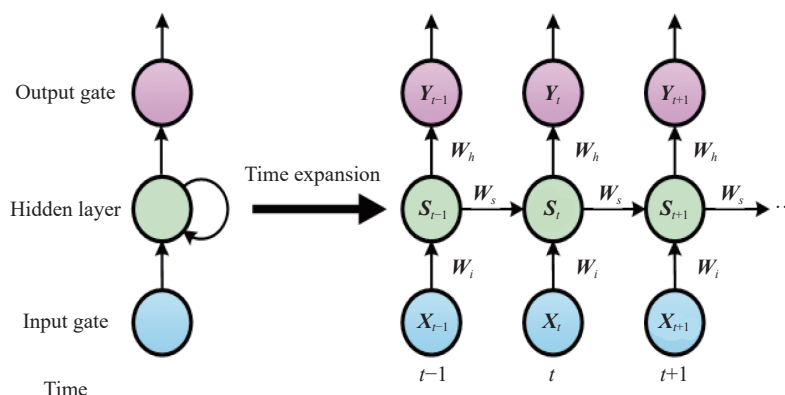


图 7 循环神经网络结构

Fig.7 RNN architecture

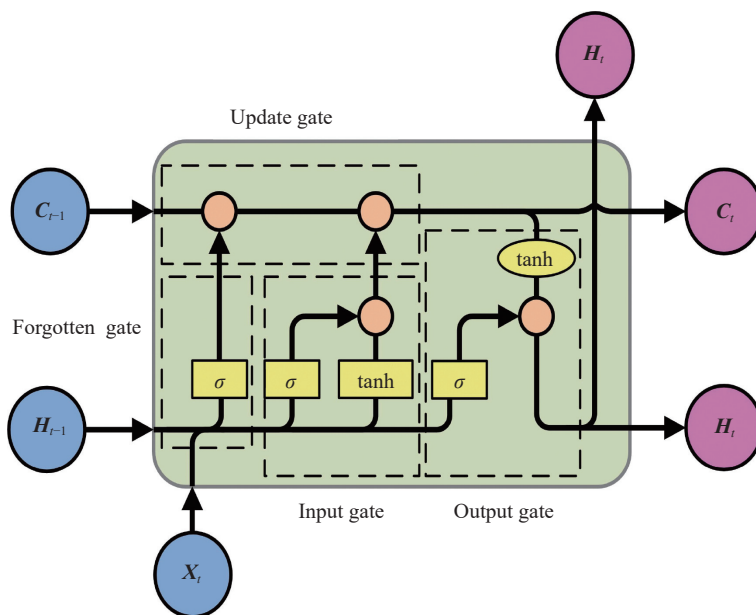


图 8 LSTM 节点模型

Fig.8 LSTM node model

信息 \hat{C}_t 。

$$i_t = \text{Sig}(W_i \cdot [X_t, H_{t-1}] + b_i) \quad (14)$$

$$\hat{C}_t = i_t \cdot \tanh(W_c \cdot [X_t, H_{t-1}] + b_c) \quad (15)$$

更新门将从上一时刻进入的旧细胞状态和当前时刻输入的新信息进行线性求和, 获取当前的细胞状态 C_t :

$$C_t = f_{gt} \cdot C_{t-1} + \hat{C}_t \quad (16)$$

最后, 输出门将 C_t 处理之后结合上一时刻的旧输出与当前时刻的新输入, 形成新的输出 H_t 。

$$o_t = \text{Sig}(W_o \cdot [X_t, H_{t-1}] + b_o) \quad (17)$$

$$H_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (18)$$

在解决连续序列回归预测的问题上, RNN 和 LSTM 都只能依靠以前时刻的信息对当前进行预测, 但是有时候未来的信息对于当前的预测也可作为重要参考。将单向网络扩展为双向结构可以不受使用输入信息的限制, 只在预设的未来框架内进行训练^[15]。如图 9 所示的 Bi-LSTM 网络由两个 LSTM 网络叠加, 一个沿着时间正向传播, 一个沿时间反向传播, 输出的结果由两个 LSTM 网络共同决定。不管是正向传播还是反向传播, 图中各神经元细胞之间的连接权重在每一个时间步都是相同的, 也就是说在 Bi-LSTM 网络模型当中这些权重是共享的, 这一点和 RNN 以及 LSTM 是相同的。

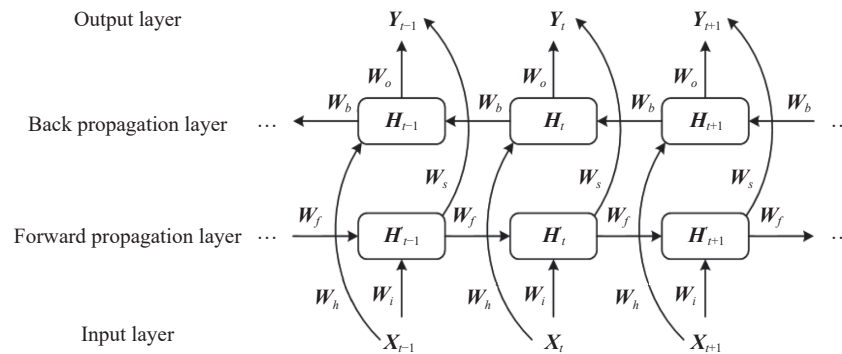


图 9 双向 LSTM 网络模型

Fig.9 Bi-LSTM network model

在正向传播层, 当前记忆细胞的输出由当前的输入 X_t 和 $t-1$ 时间步的输出 H_{t-1} 决定, 经过计算之后输出被储存下来, 既用于下一时间步的计算, 也用于输出层的计算。

$$H'_t = \text{LSTM}_{\text{forw}}(X_t, H_{t-1}', C_{t-1}') \quad (19)$$

在反向传播层, 当前记忆细胞的输出由当前的输入 X_t 和 $t+1$ 时间步的输出 H_{t+1}' 决定。

$$H_t = \text{LSTM}_{\text{forw}}(X_t, H_{t+1}', C_{t+1}') \quad (20)$$

最终模型的输出由正向传播层和反向传播层的输出结果共同决定, 即:

$$Y_t = \text{Sig}(W_s \cdot H'_t + W_o \cdot H_t + \theta_o) \quad (21)$$

双向 LSTM 不仅具有 LSTM 的长记忆、抗梯度消失或梯度爆炸的优点, 而且其双向结构对数据

的利用度更高, 预测能力更强。因此, 选择双向 LSTM 网络模型构建壁面红外辐射亮度回归预测模型, 模型以 FTIR 测量的光谱辐射亮度数据作为输入, 从正反两个方向对数据序列进行回归去噪, 然后经过全连接层的非线性映射, 最后输出光谱辐射亮度结果。

3.2 基于 Bi-LSTM 的亮度回归网络设计

为使用傅里叶光谱辐射计测量所得的光谱辐射亮度求解壁面的发射率数值, 基于双向 LSTM 网络模型, 建立一个能够实现光谱辐射亮度序列回归的深度网络, 以消除各种复杂因素对壁面发射率求解的影响。

3.2.1 数据集

使用傅里叶光谱辐射计黑体标定实验所得光谱红外辐射亮度序列做为数据集, 包含碲镉汞 (MCT) 和

碲化铟 (InSb) 两种材质探测器在 2~15 μm 波段内的测量数据。为获得两个大气窗口 (3~5 μm、8~14 μm) 波段内的最佳回归效果, 采取两个波段分别训练、分别测试的计划确定网络模型的训练集和测试集。

(1) 原始数据集选择

首先, 分别截取一定温度 T 状态下黑体的标定实验中辐射计 MCT 通道采集到的 7.5~14.5 μm 波段光谱辐射亮度和 InSb 通道采集到的 2.5~5.5 μm 波段光谱辐射亮度及其对应波长, 构成两组具有二维特征的

序列, 作为各自窗口波段回归网络的原始输入集, 如图 10 所示。其次, 已知标定实验所用黑体光源发射率为 \mathcal{E}_{bb} , 则根据黑体温度 T 和普朗克公式可以求得回归波段内黑体辐射亮度的理论数值。建立亮度回归网络的目的是让辐射计测得的亮度曲线回归到一定发射率系数的黑体理论亮度曲线上, 故原始输入集中波长对应的黑体辐射亮度理论数值就是回归网络的原始输出集。

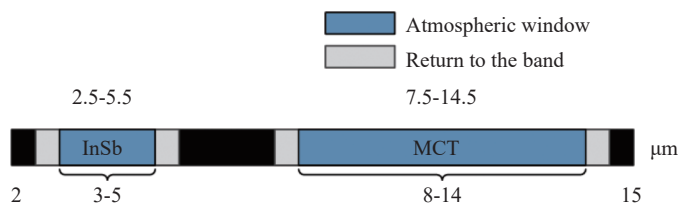


图 10 回归波段与大气窗口

Fig.10 Regression band and atmospheric window

(2) 训练集预处理

为了使亮度回归网络在一定目标温度状态下能够实现对不同发射率目标光谱辐射亮度序列的回归拟合, 需对原始数据集进行扩充, 使训练集包含更多发射率状态的输入输出数据。因此, 基于原始数据集, 将输入集和输出集中的光谱辐射亮度分别乘以不同的发射率系数, 以获取更丰富的亮度序列。

在 2.5~5.5 μm 波段, 一组原始训练集序列中包含 3749 个二维向量, 而在 7.5~14.5 μm 波段则含有 8746 个二维向量, 经过扩充后序列中的向量数量更是成倍增加。原封不动地使用全部原始数据集会导致网络训练时间大大增长, 并且过长的序列输入依然存在梯度消失的风险, 降低回归模型的准确率。因此, 在进行序列扩充前就应当对原始数据集进行精简: 每间隔四个测量数据取一个测量数据加入原始训练集, 使得两个回归波段序列的二维向量长度分别降至 750 个和 1750 个。原始训练集数据如表 1 所示。

最后, 对扩充后的训练集使用原始训练输入集的均值和标准差进行标准化, 形成最终训练集。

表 1 原始训练集数据

Tab.1 Raw training set data

Data set	Dimension	Feature	Sequence length/μm	
			2.5-5.5	7.5-14.5
Training input set	Two	λ	750	1750
		L_m		
Training output set	One	L_{bb}		

注: λ 为波长, L_m 为测量亮度, L_{bb} 为理论亮度。

3.2.2 网络结构

该亮度回归网络基于双向 LSTM 网络模型构建, 输入数据为辐射波长和测试所得辐射亮度构成的标准化二维向量, 输出则是计算所得辐射亮度数值。因此, 网络的序列输入层单元数量为 2, 输出层单元数量为 1。构建的亮度回归网络结构如图 11 所示。

在序列输入层后的第二层, 是一个包含 200 个 LSTM 单元的双向 LSTM 网络, 其中正向传播单元 100 个, 反向传播单元 100 个, 从而实现单元状态的双向传播。

而后第三层是包含 50 个单元的全连接层, 其优异的非线性映射能力会将双向 LSTM 的非线性状态

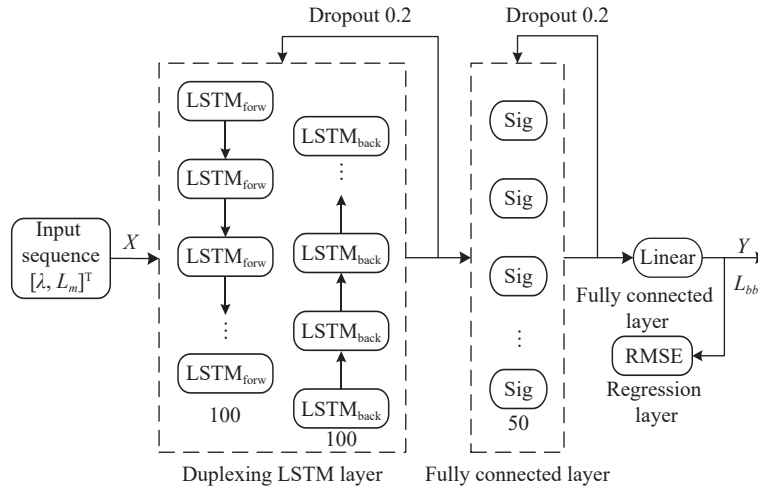


图 11 亮度回归网络结构

Fig.11 Luminance regression network structure

输出进行加权运算。

第四层则是仅包含一个正线性单元的全连接层，用以产生最终的辐射亮度输出。

其中，在第二、三层中间和第三、四层中间各添加了一个丢弃概率为 0.2 的 Dropout 层，用以防止过拟合。

第五层为回归输出层，用以计算输出训练的均方根误差 (RMSE) 损失。

3.2.3 训练结果

在网络模型训练时，设置最大迭代次数为 200 次；每次训练迭代的最小批次大小设置为原始训练集的序列长度 (750 或 1750)，其中迭代训练集和验证集比例设置为 9 : 1；训练方法为动量随机梯度下降法 (SDGM)；学习率初始值为 0.01，采用分段下降计划，每间隔 50 次迭代，学习率乘以下降因子 0.2。

原始输入集选择光谱辐射计 InSb 探测器采集到的，100 °C 下发射率 ϵ_{bb} 为 0.98 的黑体标定辐射源的测量数据。由原始输入集计算所得的黑体理论辐射亮度作为原始输出集。经过数据等间隔精简后，以标准发射率分别为 0.8、0.5、0.2、0 构造最终训练集。

训练过程中的 RMSE 损失如图 12 所示。自第 150 次迭代改变学习率后，损失函数值再无明显变化，稳定于 0.0296 上下。认为经过 200 次迭代之后，在当前训练集之下，亮度回归网络参数已收敛，训练

完成。

训练结束后，3~5 μm 波段内亮度回归网络对原始训练集的测试效果如图 13 所示，回归亮度曲线对理论亮度曲线具有较好的拟合效果，且在 4.1~4.4 μm 波段内也可以实现对离群输入值的平滑输出。

根据回归亮度数值与理论亮度数值所求得的标准黑体的光谱发射率平均值分别为 0.9817 (3~5 μm) 和 0.9794 (8~14 μm)，与标准黑体的实际发射率相吻合；对其他由标准发射率构造的训练输入集的发射率求解结果如表 2 所示。故该次训练的网络模型具有对 100 °C 目标红外光谱辐射亮度序列回归处理的准确性。

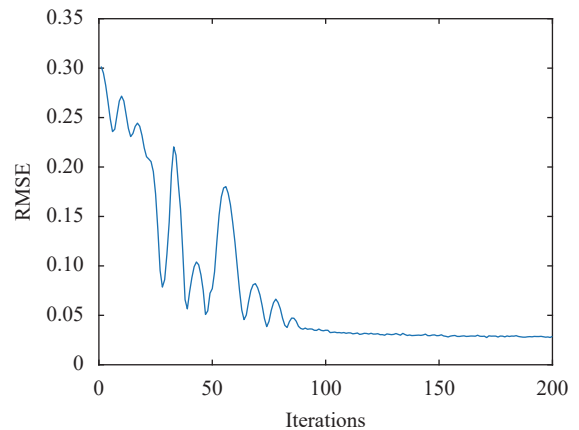


图 12 训练过程中的 RMSE 损失

Fig.12 Loss of RMSE during training

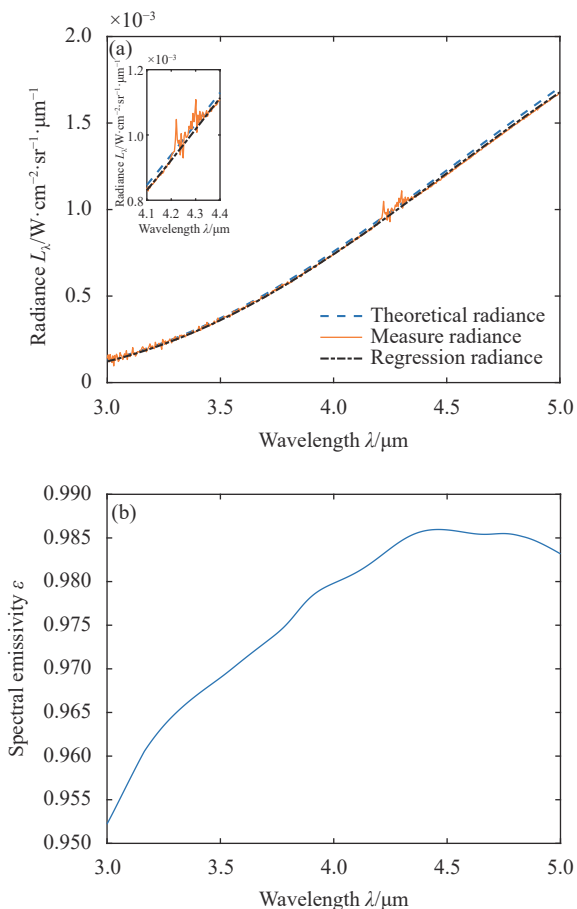


图 13 标定黑体亮度及发射率。(a) 亮度曲线; (b) 发射率曲线
Fig.13 Calibrate blackbody brightness and emissivity. (a) Radiance curve; (b) Emissivity curve

表 2 标准发射率训练输入集的求解结果

Tab.2 Results of standard emissivity training input set

Standard emissivity	Results of missivity solution/ μm		Emissivity solution error/ μm	
	3-5	8-14	3-5	8-14
0.8	0.8015	0.8035	0.187%	0.437%
0.5	0.4996	0.5009	0.080%	0.180%
0.2	0.2002	0.2007	0.100%	0.350%

4 壁面反射亮度实验测量及发射率求解

4.1 壁面反射亮度测量实验

依据前文设计的壁面反射亮度实验系统及基于双向 LSTM 网络的亮度回归模型, 以基于双向反射分布函数的发射率求解模型为理论指导, 进行壁面样品反射辐射测量实验并计算其发射率。

实验使用 ABB 公司生产的 MR170 型傅里叶光

谱辐射计进行 BRDF 测量实验。MR 系列光谱辐射计常用于军事目标识别、气象探测、物质成分分析等光学精密测量场景, 其视场中心和边缘具有极高的均匀性, 这也保证了目标在视场内的测量精度和数据的可靠程度。

实验中, 在室温 22℃ 条件下, 测试了涂层理论发射率为 0.48 的壁面样品, 其尺寸为 300 mm×500 mm×5 mm。测量系统如图 14 所示。反射亮度数据采集过程中, 入射角 θ_i 保持 0° 不变, 黑体光束垂直入射壁面, 观测角 θ_r 从 15° 开始以 10° 为间隔递增至 75°, 已知黑体光束形成的光斑面积为 0.0127 m², 在各观测角方向上的投影面积如表 3 所示。辐射计镜头视野范围为 75 mrad, 为使壁面完全处于镜头视野当中, 壁面摆放位置到镜头的距离应不小于 7.78 m, 实验中选定为 8 m。

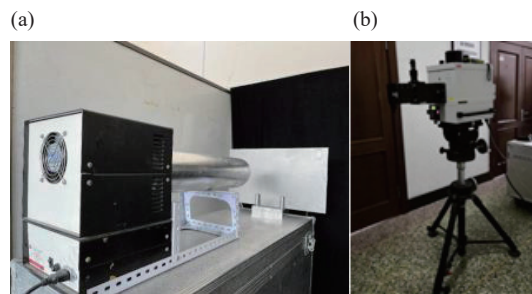


图 14 壁面反射亮度测量实验系统。(a) 反射辐射源; (b) MR170 辐射计

Fig.14 Wall reflection radiance measurement experimental system. (a) Reflected radiation source; (b) MR170 radiometer

表 3 反射区投影面积

Tab.3 Projection area of reflection area

θ_r	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°
A_r/cm^2	123	116	105	90	73	54	33

4.2 实验数据处理及发射率计算

辐射计测量所得的壁面反射辐射亮度经过亮度回归网络处理, 得到各观测角度的反射亮度回归曲线。例如, 黑体 80℃ 垂直入射壁面样品, 在观测角 $\theta_r=35^\circ$ 方向测量所得亮度曲线如图 15 所示。

对所有入射角测量所得光谱亮度做相同操作, 得到各观测角测量所得亮度回归曲线如图 16(a) 所示。随着观测角度的增大, 观测到的壁面反射辐射亮度逐

步减小,并最终趋于 22 °C 纯黑背景辐射亮度。将回归亮度曲线减去纯黑背景辐射亮度后,与除去纯黑背景辐射后的黑体理论辐射出射度作比值,计算获得

3~5 μm 波段内壁面样品的 BRDF 曲线如图 16(b) 所示。类似地,8~14 μm 波段亮度回归曲线如图 17 所示。

结合公式 (11) 和公式 (12) 即可计算出壁面样品

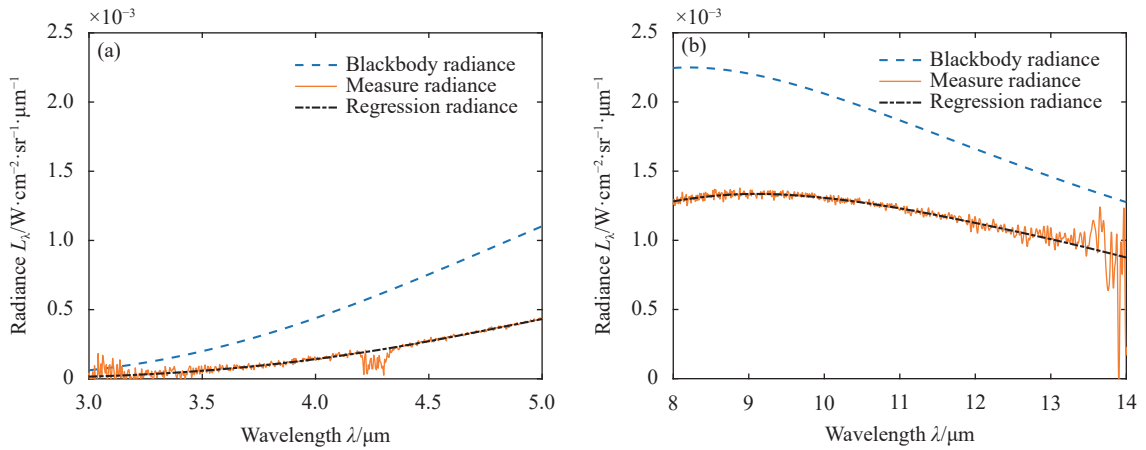


图 15 观测角度 $\theta_o=35^\circ$ 方向测量所得亮度曲线。(a) 3~5 μm; (b) 8~14 μm

Fig.15 Brightness curve measured in the direction of observation angle $\theta_o=35^\circ$. (a) 3-5 μm; (b) 8-14 μm

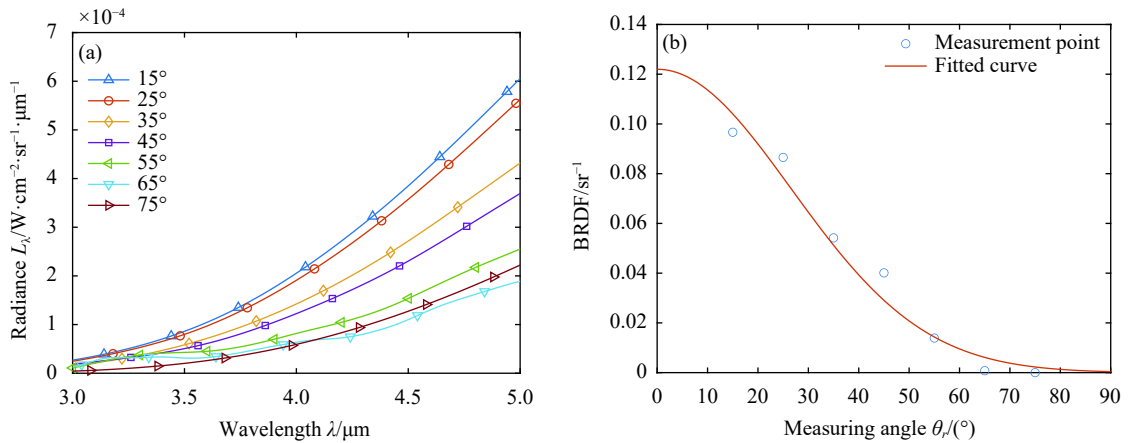


图 16 各观测角测量结果 (3~5 μm)。(a) 亮度回归曲线; (b) BRDF 曲线

Fig.16 Measurement results of each observation angle (3-5 μm). (a) Luminance regression curve; (b) BRDF curve

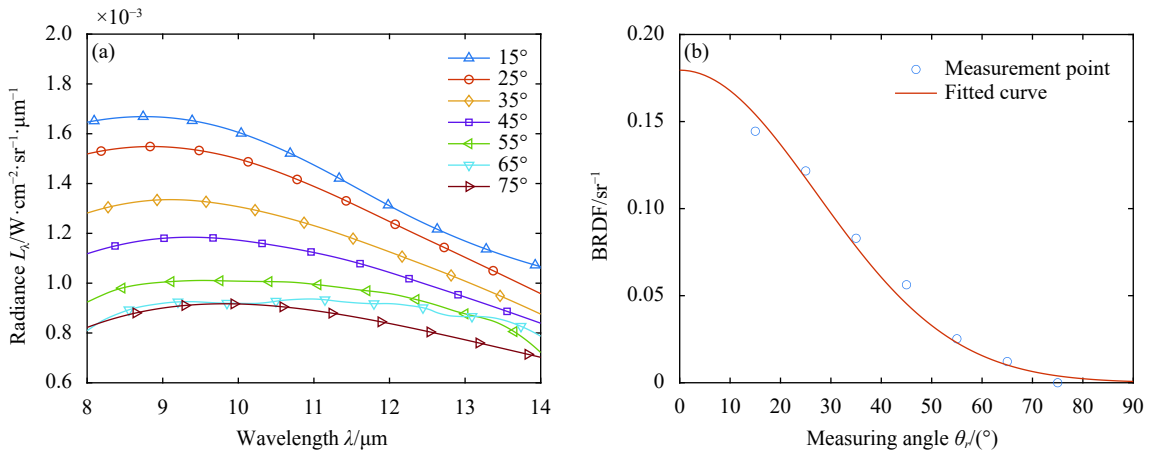


图 17 各观测角测量结果 (8~14 μm)。(a) 亮度回归曲线; (b) BRDF 曲线

Fig.17 Measurement results of each observation angle (8-14 μm). (a) Luminance regression curve; (b) BRDF curve

垂直方向在两个大气窗口内的平均发射率为 0.4214, 与壁面样品理论发射率之间的相对误差为 12.21%。

5 结 论

文中应用双向反射分布函数构建了基于 BRDF 的壁面发射率求解模型。然后优化设计了壁面反射亮度测量实验系统的光源和光路。为尽可能消除外界干扰对于光谱发射率求解精度的影响, 基于双向长短期记忆网络, 提出了 Bi-LSTM 亮度回归网络模型, 将特定温度下的光谱亮度数据输入网络训练学习, 以提高亮度回归网络模型求解壁面发射率的准确性。最后, 依据基于 BRDF 的壁面发射率求解模型及基于 Bi-LSTM 网络的亮度回归模型进行了实验及数据处理, 绘制了壁面样品法线方向入射辐射的 BRDF 曲线, 并计算了壁面的发射率。计算结果显示, 对实验目标采取该非接触式间接测量发射率的求解方法, 其发射率相对误差为 12.21%, 满足工程设计要求。为壁面发射率求解方法提供了新的途径和工程借鉴。

参考文献:

- [1] Xia Meng, He Hongbin, Li Guangping, et al. Applying infrared detection technology to detecting the physiological temperature of snails [J]. *Journal of Tropical Diseases and Parasitology*, 2016, 14(3): 128-132. (in Chinese)
- [2] Zhu J S, Ren H Z, Ye X, et al. Ground validation of land surface temperature and surface emissivity from thermal infrared remote sensing data [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(8): 1538-1566. (in Chinese)
- [3] Cao Feifei, Ji Honghu, Yu Mingfei, et al. Effects of low emissivity material coating site on wall temperature and infrared characteristics of exhaust system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20190131. (in Chinese)
- [4] Ding Wenhao, Zhang Xia, Fang Qi. Research progress of infrared radiation characteristic calibration technology [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2021, 41(1): 9-14. (in Chinese)
- [5] Cheng Shengyue, Liu Zhaohui, Deng Zhiping, et al. Research progress on infrared characteristic of military target [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 577-581. (in Chinese)
- [6] Yao Kaikai, Wang Hao, Xu Fan, et al. Application research of spectrometer in evaluation of infrared stealth effect of aero-engine [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(8): 975-980. (in Chinese)
- [7] Li Meng, Guo Juan, Ji Xinjie, et al. Research on calibration of infrared stealth coating spectral emissivity measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 382-387. (in Chinese)
- [8] Yang Baixue, Du Yongming, Xiao Qing, et al. Study of effecting factors on emissivity measurement by integrating sphere with monte carlo simulation [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(1): 149-157. (in Chinese)
- [9] Fu T, Tan P, Pang C. A steady-state measurement system for total hemispherical emissivity [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(2): 025006.
- [10] Yuan Yan, Jin Ding, Su Lijuan. Optimization modeling and verification of bidirectional reflectance distribution function for rough surfaces [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 052901. (in Chinese)
- [11] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [12] Xi Jianhui, Xu Zhenfang, Fu Li, et al. Modeling infrared radiance and calculating spectral emissivity based on RBF network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S104004. (in Chinese)
- [13] Yang C, Zhao D, Dai J. A new method for constructing spectral emissivity models for measuring the real temperature of targets [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(6): 2549-2553.
- [14] Yu Y, Si X, Hu C, et al. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures [J]. *Neural Computation*, 2019, 31(7): 1235-1270.
- [15] Schuster M, Paliwal K K. Bidirectional recurrent neural networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(11): 2673-2681.