

文章编号: 1672-8785(2025)04-0033-09

基于改进 DBO 算法的红外发射率求解

傅 莉¹ 陈广明¹ 孙 旭² 席剑辉¹

(1. 沈阳航空航天大学自动化学院, 辽宁 沈阳 110136;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要: 针对应用反射法的发射率求解问题, 提出一种基于双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)的发射率间接求解方法。设计出反射亮度测量系统, 采用 MR170 型辐射计测量多个角度下的壁面反射亮度数据, 并利用门控循环单元(Gated Recurrent Unit, GRU)网络对 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的反射亮度数据进行回归处理以排除大气吸收干扰。为准确反演出 BRDF 模型参数, 在蜣螂优化(Dung Beetle Optimization, DBO)算法的基础上, 通过加入混沌映射初始化、柯西变异和可变螺旋搜索三种策略对算法进行改进。计算不同角度下的 BRDF 值后, 利用改进算法反演五参数函数模型的参数值, 进而获得整个空间范围内的红外辐射分布。与其他算法相比, 改进算法的收敛速度具有较大的提升, 最终求解的发射率为 0.4236, 与理论测试样品之间的相对误差为 11.75%。该研究可为间接求解发射率问题提供参考。

关键词: 双向反射分布函数; 蜣螂优化算法; 红外发射率; 红外辐射亮度

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.04.005

Solution of Infrared Emissivity Based on Improved DBO Algorithm

FU Li¹, CHEN Guang-ming¹, SUN Xu², XI Jian-hui¹

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

2. Shenyang Engine Research Institute of AECC, Shenyang 110015, China)

Abstract: Aiming at the problem of emissivity solution using the reflection method, an indirect solution method of emissivity based on bidirectional reflectance distribution function (BRDF) is proposed. A reflection brightness measurement system is designed, and the wall reflection brightness data at multiple angles are measured by the MR170 radiometer. The reflection brightness data in the 3–5 μm and 8–14 μm bands are regressed by the gated recurrent unit (GRU) network to eliminate the interference of atmospheric absorption. In order to accurately invert the BRDF model parameters, the algorithm is improved by adding three strategies: chaotic mapping initialization, Cauchy mutation and variable spiral search on the basis of the dung beetle optimization (DBO) algorithm. After calculating the BRDF values at different angles, the parameter values of the five-parameter function model are inverted by the improved algorithm, and then the infrared radiation distribution in the entire space is obtained. Compared with other algorithms, the convergence speed of the im-

收稿日期: 2024-12-17

基金项目: 电磁信息控制与效应全国重点实验室开放基金项目(20230201)

作者简介: 傅莉(1968-), 女, 辽宁凤城人, 教授, 主要从事红外隐身测试与智能控制技术研究。

E-mail: ffulli@163.com

proved algorithm is greatly improved, the final emissivity is 0.4236, and the relative error between the theoretical test sample and the algorithm is 11.75%. This study can provide a reference for indirectly solving the emissivity problem.

Key words: bidirectional reflectance distribution function; dung beetle optimization algorithm; infrared emissivity; infrared radiation brightness

0 引言

红外发射率是反映目标红外辐射特征的重要参数。对于高温壁面,除了对其辐射出射度进行直接测量之外,还可以求出反射率,进而间接求解发射率。由于目标壁面涂有低发射率涂层,受光表面在光线入射时会在表面产生散射效应。BRDF 可以表示物体表面对光线的反射特征,进而反映其光学特性。

BRDF 模型在 1970 年最先由 Nicodemus F E 提出^[1],在非接触式测量、目标识别、材料特性分析等领域具有广泛的应用^[2-4]。近年来对 BRDF 模型的研究更加深入。Phong B T^[5]采用法向插值法提出 Phong 光照模型,用于计算机图像学中的光照模拟。Cook R L 等^[6]介绍一种反射模型,研究了相同条件下不同材料以及不同光源的相对亮度,描述出反射光线的散射分布情况。Felix K 等^[7]真实地估计衍射光栅的散射行为,建立了一种简易半分析模型。李卓然等^[8]设计了一种具有较高精度的 BRDF 测量系统,可在半球空间内测量目标任意角度内的 BRDF 值。汪杰君等^[9]提出一种改进的 pBRDF 模型,得到了材料的复折射率、角度和波段等因素之间的数学模型。张潞等^[10]对 BRDF 模型参数进行反演,设计出基于 BRDF 模型的反射率求解方法。李铁等^[11]提出四参数模型,根据 BRDF 模型参数估计,获得了三维空间内的 BRDF 分布情况。吴振森等^[12-13]对 BRDF 模型进行简化,提出了五参数 BRDF 模型。

由于对非加热壁面求解发射率时使用非接触式测量方法往往受到环境温度等因素的影响,求解结果会出现较大误差。针对此问题,基于 BRDF 提出用改进 DBO 算法来反演五参

数 BRDF 模型,以减小求解结果的相对误差。

1 双向反射分布函数模型

1.1 BRDF 模型原理

作为描述光线在物体表面反射情况的数学模型,BRDF 体现了物体基本的光学特性,受到波长、辐射亮度、入射/反射光的角度以及物体自身内在性质的影响。在物体表面上,入射光线的方向与反射光线的方向一般不一致,通常会存在一定的角度差。BRDF 模型可以描述特定入射角下在该表面反射出的所有方向的光线强度。

BRDF 是一个四维函数,可以应用在镜面反射、漫反射以及其它各种反射情况中。图 1 为 BRDF 原理图。

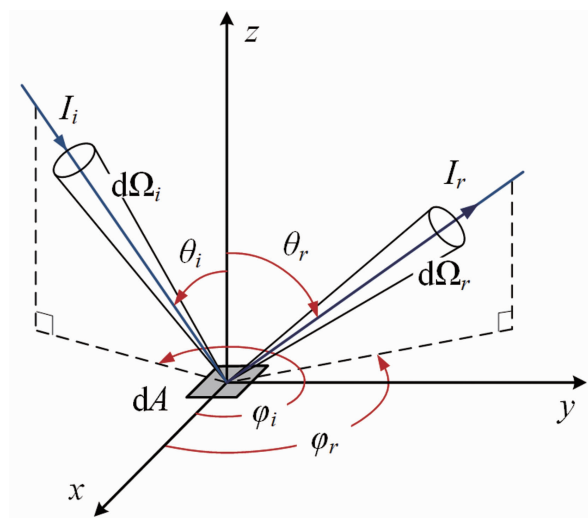


图 1 BRDF 原理图

BRDF 用来定义为给定入射方向上的辐射照度如何影响出射方向上的辐射率,其数学定义涉及到入射光方向、反射光方向以及法线。它描述了从一个方向入射到表面的光线如何被反射到另一个方向,这个比例可以通过方位角和天顶角来实现参数化:

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

式中, λ 表示波长; θ_i 表示入射天顶角; φ_i 表示入射方位角; θ_r 表示出射天顶角; φ_r 表示出射方位角; dL 表示辐射亮度; dE 表示辐射照度。

1.2 五参数 BRDF 模型

针对金属合金模型的反射特性, 用四参数 BRDF 模型进行表征:

$$f = \frac{M}{\cos^p \theta_i} \exp(-\tan^2 \theta_r / q^2) + N \cos^p \theta_i \quad (2)$$

式中, M 表示镜面反射幅度系数; N 表示漫反射幅度系数; q 表示镜面反射系数; p 表示漫反射系数。

上述模型一般视为接收发射同路模型, 即 $\theta_i = \theta_r$ 且 $\varphi_i = \varphi_r$, 故难以体现物体的三维空间分布情况。对此, 采用 Cook R L 等^[6]提出的五参数 BRDF 模型来表征目标的表面反射特性, 将 $\varphi_i = 0$ 时的所求值代替其余角度下的求解结果:

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = k_j \left[f_n(\alpha) R_0(\alpha) \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i} \right] \quad (3)$$

式中, $f_n(\alpha)$ 为镜面反射系数; $R_0(\alpha)$ 为非涅尔反射系数; G 为遮蔽函数。

在目标表面反射特性求解中, 当测量角度处在大入射角和大观测角条件下, 相邻壁面会存在遮掩情况。除此情况外, 可以认为遮蔽函数值为 1, 则 BRDF 函数可修改为

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = k_j \left[\frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \times \exp(j(1 - \cos \gamma)^h) \frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i} \right] \quad (4)$$

式中, h 、 j 为待定系数; k_r 为描述镜面程度的参数, 随镜像程度的突出而变小; k_j 为镜反射系数, k_d 为漫反射系数, 二者之间的关系为 $k_j + k_d \leq 1$ 。

2 反射亮度数据获取

2.1 反射亮度测量系统

为获取不同角度下的反射辐射亮度, 在反

射亮度测量实验中, 使用标准面源黑体作为光源发射红外光束, 垂直入射至目标壁面样品, 以得到较为固定且均匀的光束。图 2 为面源黑体实物图。



图 2 面源黑体实物图

将面源黑体产生的光束, 通过束光筒和斩波器的调节后照射到壁面样品上, 经反射后通过辐射计的光学系统将反射光进行收拢和分散; 随后经传感器的作用, 将接收到的光信号转换为电信号, 再传送给前置放大器和锁相放大器。锁相放大器把带有一定频谱的光信息筛选出来并加以放大, 用于控制从周围环境中散射的其他光束, 借以改善信噪比。被放大后的光电信号通过模数 (Analog-to-Digital, A/D) 转换器变成数字信息。然后将处理后的数据传送给上位机。图 3 和图 4 分别为测量系统框图和反射亮度测量光路示意图。

2.2 反射亮度数据处理

基于此反射亮度测量系统, 应用傅里叶红外辐射计在 $15^\circ \sim 75^\circ$ 角度范围内, 每隔 10° 为一个测量角度, 共测量 7 个角度下的反射亮度数据。由于测量过程受到大气吸收等作用的影响, 采用 GRU 亮度回归网络对测得的辐射亮度数据进行处理, 可消除外界环境对数据的扰动。各个角度下的目标壁面辐射亮度如图 5 和图 6 所示。

3 改进蜣螂优化算法

3.1 DBO 优化算法

DBO 算法^[14]是通过模拟蜣螂社会活动过程的一种群体智能优化方法。蜣螂总是尽可能

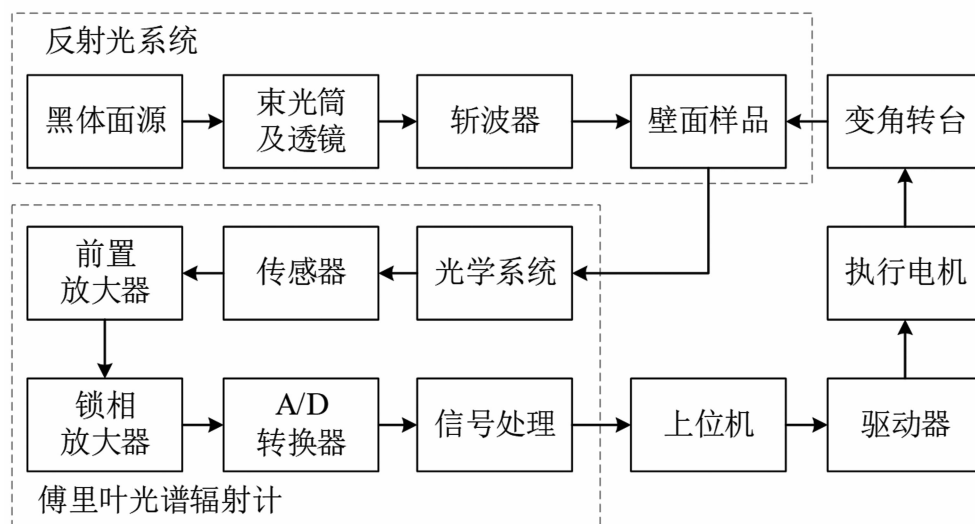


图 3 反射亮度测量系统的组成框图

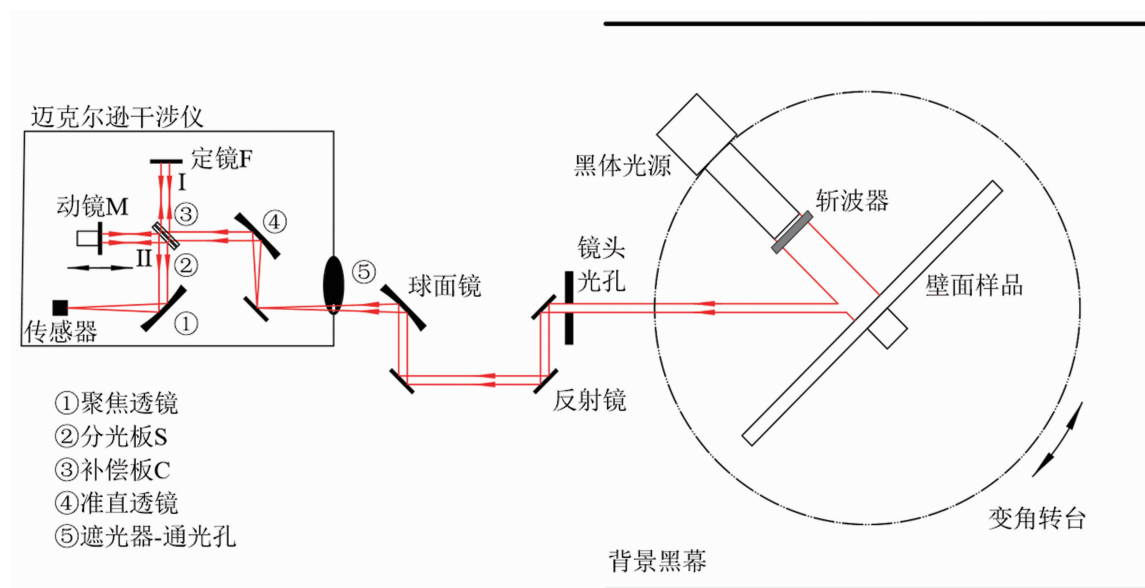


图 4 反射亮度测量光路示意图

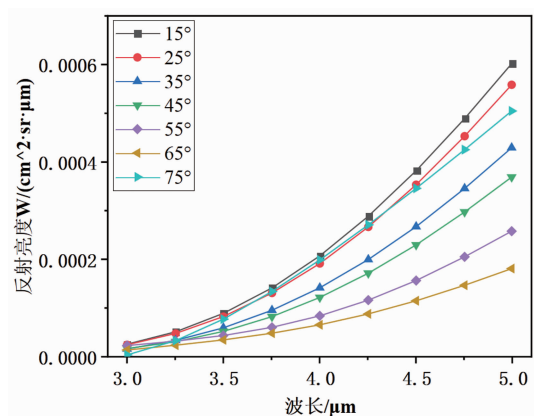


图 5 壁面反射亮度回归曲线(3~5 μm)

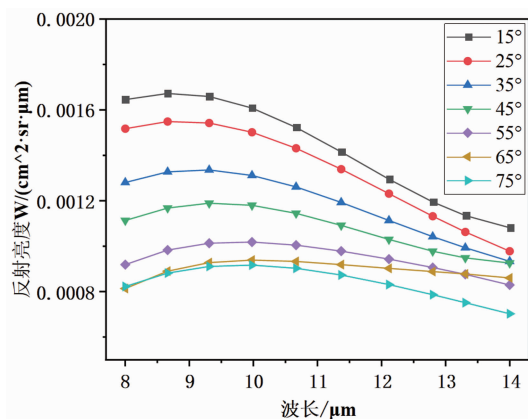


图 6 壁面反射亮度回归曲线(8~14 μm)

选择一个最优的位置来保持高效地推动粪球。在路径的选择上, 其推球的路径是一条直线, 碰到障碍后则会通过跳舞行为来选择前进的方向。为确保安全, 选择到达安全区域后产卵和觅食, 最后种群内有蜣螂会盗取其他个体的粪球。蜣螂滚球、跳舞、繁殖觅食和偷窃四种行为可分别加以表示。

3.1.1 滚球行为

蜣螂在推动粪球时, 要确保粪球沿直线前进。它们在搜索空间内需要按照某一预设方位前进, 其滚球行为时的位置更新过程可描述为

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \alpha \times k \times x_i(t-1) + b \times \Delta x, \\ \Delta x = |x_i(t) - X^w| \quad (5)$$

式中, $x_i(t+1)$ 为第 i 只蜣螂在第 t 次迭代后的位置; k 为偏转系数; b 为自然系数; α 为 1 时表示环境并不影响其原始方向, α 为 -1 时表示受环境影响后与原始方向偏离; X^w 为种群范围内的最差位置; Δx 表示光强的变化程度, Δx 值越高, 表示光源越弱, 帮助蜣螂避开此位置, 可以在优化过程中避免陷入局部最优。

3.1.2 跳舞行为

当蜣螂前行遇阻时, 需要进行跳舞行为来重新选择, 以获得新的前进方向。利用切线函数获得新的前进方向, 其区间为 $[0, \pi]$ 。当角度为 0、 $\pi/2$ 和 π 时, 蜣螂不会改变位置。当蜣螂确定新的方向时, 它会继续向后滚动粪球。此时蜣螂的位置更新方式为

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \tan(\theta) |x_i(t) - x_i(t-1)| \quad (6)$$

3.1.3 繁殖和觅食行为

蜣螂会通过粪球产卵进行繁殖, 新生个体的位置即为产卵粪球的位置。蜣螂会选择一个安全位置进行产卵, 其定义如下:

$$Lb^* = \max(X^* \times (1-R), Lb), \\ Ub^* = \min(X^* \times (1-R), Ub) \quad (7)$$

式中, Lb^* 、 Ub^* 分别为产卵区域的下、上限; Lb 、 Ub 分别为搜索空间的下、上限; X^* 为当前种群内的最优位置。

每只雌虫在每次迭代时只产生一个卵, 对应一个解。孵卵粪球的位置受产卵区的边界范

围影响, 都是动态变化的, 其定义如下:

$$B_i(t+1) = X^* + b_1 \\ \times (B_i(t) - Lb^*) + b_2 \times (B_i(t) - Ub^*) \quad (8)$$

式中, $B_i(t)$ 为第 t 次迭代时第 i 个孵卵粪球的位置; b_1 、 b_2 为随机向量; D 为维数。

当小蜣螂孵化成功后, 它们会跑出来成群觅食, 因此需要建立最佳觅食区域来引导它们。

$$Lb^b = \max(X^b \times (1-R), Lb) \\ Ub^b = \min(X^b \times (1+R), Ub) \quad (9)$$

式中, X^b 为全局最优位置; Lb^b 、 Ub^b 为最佳觅食区域的下、上限。小蜣螂的位置更新方式为

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C_1 \times (x_i(t) - Lb^b) \\ + C_2 \times (x_i(t) - Ub^b) \quad (10)$$

式中, $x_i(t)$ 为第 t 次迭代时第 i 只小蜣螂的位置; C_1 为随机数; C_2 为随机向量。

3.1.4 偷窃行为

蜣螂群体中存在一部分的偷窃者, 它们会偷走其他个体的粪球。假设 X^b 周围是抢夺食物的最佳位置。在迭代过程中, 偷窃者的位置更新方式为

$$x_i(t+1) = X^b + S \times g \\ \times (|x_i(t) - X^*| + |x_i(t) - X^b|) \quad (11)$$

式中, $x_i(t)$ 为第 t 次迭代中第 i 个偷窃者的位置; g 为随机向量; S 为常量。 X^b 为最后输出的全局最佳位置。

3.2 改进策略

通过分析上述 DBO 算法优化方式, 针对此群体优化算法的特点, 提出三种策略对算法进行改进, 即 BSVDBO 算法。下面介绍具体改进策略。

3.2.1 加入混沌映射初始化

在算法初始化阶段, 应用 Bernoulli 映射加快种群搜索速度, 使算法较快收敛:

$$z_{k+1} = \begin{cases} z_k / (1-\lambda), & z_k \in (0, 1-\lambda] \\ (z_k - 1 + \lambda) / \lambda, & z_k \in (1-\lambda, 1) \end{cases} \quad (12)$$

3.2.2 加入柯西变异

通过加入柯西变异对算法进行改进, 防止

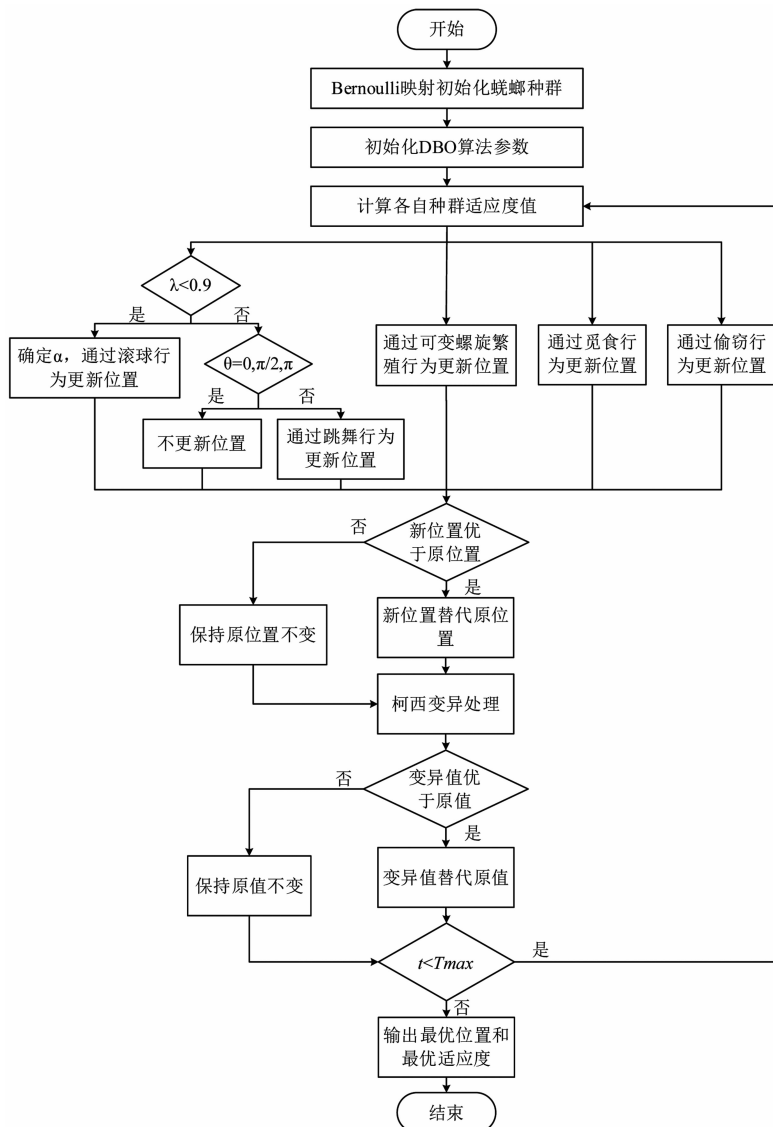


图 7 改进后的蜣螂算法流程图

算法陷入局部最优。利用随机扰动增加搜索空间的多样性, 进而提高搜索最优值的能力。其公式为

$$x_{\text{newbest}}(t) = x_{\text{best}}(t) \times (1 + \text{cauchy}(0, 1)) \quad (13)$$

式中, $x_{\text{best}}(t)$ 为经 t 次迭代后的最优个体值; $x_{\text{newbest}}(t)$ 为经 t 次迭代后的最优个体值受柯西变异后的结果; $\text{cauchy}(0, 1)$ 表示标准柯西分布的概率密度函数。柯西分布产生较大扰动的原因是其在原点处的值较小, 在两端处较为扁平, 趋近 0 的速率较慢。

3.2.3 加入可变螺旋搜索策略

在算法繁殖策略过程中, 引入惯性权值以避免算法陷入局部最优。但其局限性在于, 此策

略下个体附近经迭代产生新的个体, 降低了种群多样性, 使得算法仍然可能陷入局部最优。

通过加入螺旋搜索策略更新个体位置, 可以保证在不影响算法收敛速度的同时增加个体的多样性。因此, 在繁殖策略下加入可变螺旋位置更新策略, 可以使算法的全局和局部搜索能力达到平衡的状态。鲸鱼优化算法围猎阶段的数学表达式为

$$X(t+1) = D' \cdot e^{cl} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t)$$

$$D' = |X^*(t) - X(t)| \quad (14)$$

式中, 螺旋参数 c 不是固定值: c 值较大会导致算法衰减速度过快; c 值较小会导致算法收敛缓慢。因此, 螺旋参数应是一种可变螺旋,

应用上文加入的惯性权重, 动态调整搜索过程的螺旋形状, 以提高算法的搜索速度和全局搜索能力。调整后的可变螺旋参数可表示为

$$r = \exp(k \cos(\pi \times R)) \quad (15)$$

式中, R 为惯性权重; k 为变化系数。在算法繁殖阶段的雌虫产卵过程中加入可变螺旋搜索策略后, 公式表示为

$$B_i(t+1) = X^* + e^{rl} \cdot \cos(2\pi l) \times b_1 \times (B_i(t) - Lb^*) + e^{rl} \cdot \cos(2\pi l) \times b_2 \times (B_i(t) - Ub^*) \quad (16)$$

式中, l 为 $[-1, 1]$ 内均匀分布的随机数。改进后算法的计算流程如图 7 所示。

将回归处理后的反射亮度与理想黑体辐射理论值相除, 即可求解出 7 个角度下的 BRDF 值。由于壁面表面具有各项异性的特点^[15], 需要对整个空间角度的 BRDF 值进行反演, 才能准确得到其反射特性。反演 BRDF 模型参数是一个逆问题的求解过程。对两个红外波段的反射亮度数据进行积分, 然后将积分数值作为实际的 BRDF 值, 并将各角度下的 BRDF 值结合五参数模型, 应用改进的 DBO 优化算法对其进行反演(结果见图 8 和图 9)。

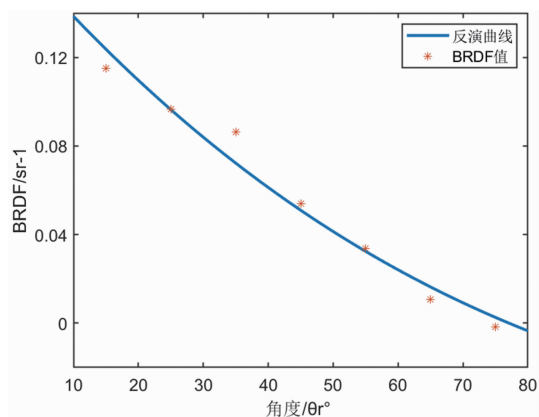


图 8 各观测角度下的 BRDF 值(3~5 μm)

在两个红外波段的五参数 BRDF 模型反演中, 应用改进后的蜣螂优化算法并将其与原始 (DBO) 算法、遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[16] 以及鲸鱼优化算法 (Whale Optimization Algorithm, WOA)^[17] 进行对比。各算法的收敛速度如图 10 和图 11 所示。

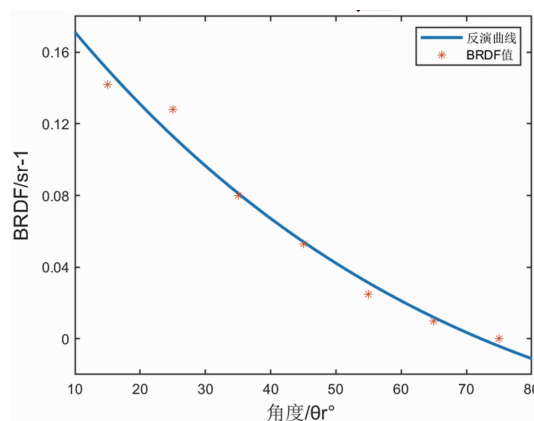


图 9 各观测角度下的 BRDF 值(8~14 μm)

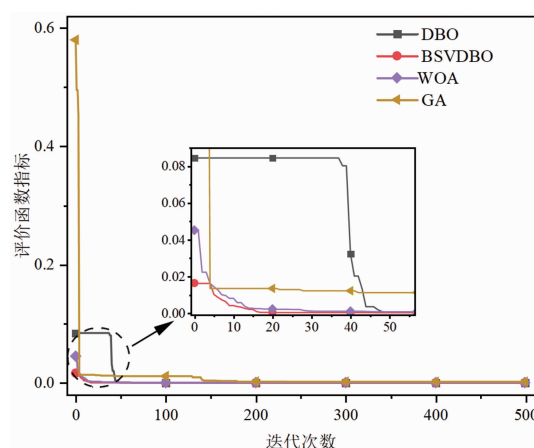


图 10 反演 BRDF 模型的收敛曲线(3~5 μm)

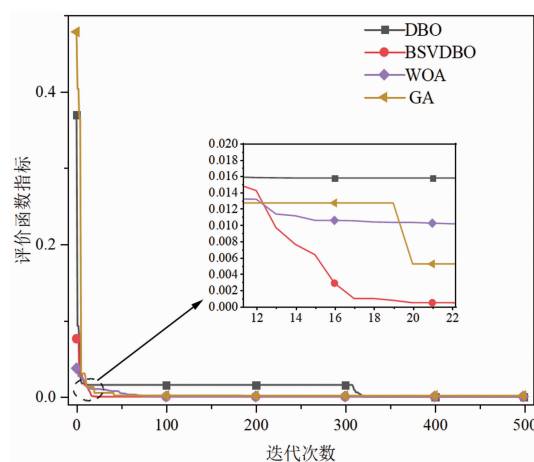


图 11 反演 BRDF 模型的收敛曲线(8~14 μm)

由收敛曲线可知, 改进后的算法相较于其他算法, 收敛速度明显提升且收敛速度最快。加入混沌映射初始化策略, 使算法的初始点更接近全局最优解, 有助于提高算法的收敛速度; 加入柯西变异以及可变螺旋搜索策略, 使

算法能够更快地跳出局部最优。改进后算法的收敛速度提高了一倍以上。

4 发射率求解模型

半球发射率定义为辐射体的辐射出射度与相同温度下绝对黑体的辐射出射度之比。半球全发射率定义如下：

$$\epsilon_h(T) = \frac{M(T)}{M_{bb}(T)} \quad (17)$$

式中, $M(T)$ 为物体的辐射出射度; $M_{bb}(T)$ 为黑体全辐射出射度。

半球光谱发射率定义如下：

$$\epsilon_{\lambda}(T) = \frac{M_{\lambda}(T)}{M_{\lambda bb}(T)} \quad (18)$$

式中, $M_{\lambda}(T)$ 为物体的辐射出射度; $M_{\lambda bb}(T)$ 为黑体辐射出射度。

上述描述均在相同温度 T 的条件下进行的。辐射功率可通过对空间内的立体角积分求得：

$$dP = \int d^2P = \left[\int_{2\pi} L \cos\theta d\Omega \right] dA \quad (19)$$

由辐射出射度定义可得到 L 与 M 之间的关系：

$$M = \frac{dP}{dA} = \int_{2\pi} L \cos\theta d\Omega \quad (20)$$

当垂直入射光线照射物体表面时, 散发的能量会向整个半球空间内发散。观测方向上的空间角定义如图 12 所示。

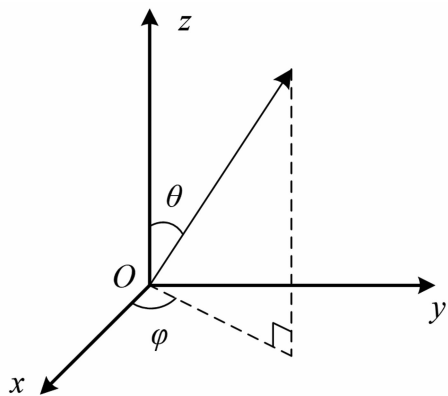


图 12 观测方向上的空间角定义

由基尔霍夫定律可知, 非透明物体的透射率大小可以近似为零, 则发射率可表示为 1—

ρ , 其中 ρ 为反射率。

非镜面反射的目标壁面的辐射功率 P_r 与立体角 Ω 的关系为

$$dP_r = \left[\int_{2\pi} L_{in}\rho(\theta) d\Omega \right] dA \quad (21)$$

式中, L_{in} 为入射辐射亮度; $L_{in}\rho(\theta)$ 为反射的辐射亮度; 立体角 $d\Omega = \sin\theta d\phi d\theta$ 。反射出的总辐射出射度为

$$M_r = \frac{dP_s}{dA} = \int_{2\pi} L_{in}\rho(\theta) d\Omega = \int_{\phi} \int_{\theta} L_r(\theta) \sin\theta d\phi d\theta \quad (22)$$

针对某个漫反射源, 反射率可以表示为辐射出射度 M_r 与辐射照度 E_m 之比, 即

$$\rho = \frac{M_r}{E_m} \quad (23)$$

当黑体辐射源照射反射源时, 可认为辐射照度与黑体的辐射出射度相等, 由此得到反射率的计算公式：

$$\rho = \frac{M_r}{M_{bb}} = \frac{\int_{\phi} \int_{\theta} L_r(\theta) \sin\theta d\phi d\theta}{M_{bb}} \quad (24)$$

在实际测量中, 难以持续观测各方向上的辐射亮度值, 因此可将整个半球空间按 θ 角方向平均划分成 n 份, 以 θ_k 作为划分出每份的中心角度。

光线沿垂直方向照射到目标壁面的反射亮度包线如图 13 所示。

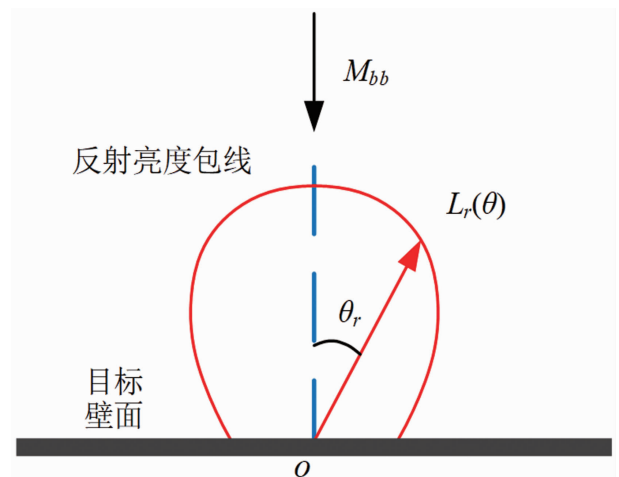


图 13 反射亮度包线

得到反射率计算公式的离散形式：

$$\rho = \frac{M_r}{M_{ib}} = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{\phi_{i1}}^{\phi_{i2}} \int_{\theta_{i1}}^{\theta_{i2}} L_r(\theta_k) \sin\theta d\phi d\theta}{M_{ib}} \quad (25)$$

根据测试所得的环境亮度以及辐射出射度, 目标的反射率可表示为

$$\rho = \frac{M_r}{M_{ib}} = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{\phi_{i1}}^{\phi_{i2}} \int_{\theta_{i1}}^{\theta_{i2}} (L_r(\theta_k) - L_g) \sin\theta d\phi d\theta}{M_{ib} - M_g} \quad (26)$$

式中, L_g 为环境亮度; M_g 为辐射出射度。

最终求得待测目标的发射率公式:

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (27)$$

以上是在无法对目标加热时采用间接方法求解发射率。结合式(26)和式(27), 基于反射法原理可求得目标发射率为 0.4236, 与目标样品的理论发射率之间的相对误差为 11.75%, 在允许误差 15% 范围之内。

5 结束语

针对非加热壁面发射率的求解问题, 基于五参数 BRDF 模型, 通过设计壁面反射亮度测量实验得到测量数据。主要结论如下:

(1) 搭建壁面反射亮度测量系统, 测量出多个不同角度下的红外辐射亮度。利用神经网络对反射亮度数据进行回归处理后, 根据 BRDF 定义求得各个角度下的 BRDF 值。

(2) 针对双向反射分布函数五参数模型的参数反演辨识, 提出一种改进的 DBO 算法, 即 BSVDBO 算法。通过混沌映射初始化、柯西变异和可变螺旋搜索等策略对 DBO 算法的初始化及寻优过程进行改进。改进后算法的收敛速度明显提升且更容易跳出局部最优。

(3) 根据发射率求解模型, 结合实验测量数据, 最终求解的壁面发射率为 0.4236。与壁面样品理论发射率之间的最大误差为 11.75%, 可满足工程误差要求。

由于使用反射法间接求解发射率, 求解结果与理论值之间还存在较大的误差。测量实验的设计环节还具有较大的优化空间, 以减小测量误差, 进而获得更精确的计算结果。

参考文献

- [1] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1970, **9**(6): 1474-1475.
- [2] 徐灿, 张雅声, 李鹏, 等. 基于 OpenGL 拾取技术的空间目标光学横截面积计算 [J]. *光学学报*, 2017, **37**(7): 218-227.
- [3] 王付刚, 张伟, 汪洪源. 基于 BRDF 的在轨卫星反射特性 [J]. *光电工程*, 2011, **38**(9): 6-12.
- [4] 张磊, 杨鹏翎, 赵海川, 等. 铜铝材料粗糙表面的 BRDF 特性研究 [J]. *现代应用物理*, 2018, **9**(4): 65-69.
- [5] Phong B T. Illumination for computer generated pictures [J]. *Communications of the ACM*, 1975, **18**(6): 311-317.
- [6] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1982, **1**(1): 7-24.
- [7] Felix K, Matthias Z, Tilman G. Semi-analytic modeling of diffraction grating BRDF using scalar Fourier optics [C]. *SPIE*, 2021, **11783**: 1178304.
- [8] 李卓然, 李雨霄, 刘子龙. 近红外波段高精度 BRDF 测量系统研究 [J]. *光学学报*, 2022, **42**(12): 177-184.
- [9] 汪杰君, 王鹏, 王方原, 等. 材料表面偏振双向反射分布函数模型修正 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, **57**(9): 210-216.
- [10] 张璐, 樊金浩, 鲁宇轩, 等. 改进鲸鱼优化算法的壁面红外反射特性求解 [J]. *中国光学*, 2024, **17**(3): 595-604.
- [11] 李铁, 王航宇, 王宏军. 目标表面 BRDF 统计建模中的遗传模拟退火算法 [J]. *量子电子学报*, 2008, **25**(4): 489-492.
- [12] 吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 897-901.
- [13] 杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 313-318.

(下转第 48 页)

-
- [6] Blázquez-Castro A. Optical tweezers: Phototoxicity and thermal stress in cells and biomolecules [J]. *Micromachines*, 2019, **10**(8): 507.
- [7] Crozier K B. Quo vadis, plasmonic optical tweezers [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, **8**(1): 35.
- [8] Crozier K B. Plasmonic Nanotweezers: What's Next [J]. *ACS Photonics*, 2024, **11**(2): 321–333.
- [9] Liu Z, Kuang T, Xiong W, et al. Self-feedback induced bistability in dual-beam intracavity optical tweezers [J]. *Optics Letters*, 2021, **46**(21): 5328–5331.
- [10] Kotsifaki D G, Kandyla M, Lagoudakis P G. Plasmon enhanced optical tweezers with gold-coated black silicon [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 26275.
- [11] Wang Y, Wu J, Moradi S, et al. Generating and detecting high-frequency liquid-based sound resonances with nanoplasmonics [J]. *Nano Letters*, 2019, **19**(10): 7050–7053.
- [12] Koya A N, Cunha J, Guo T L, et al. Novel plasmonic nanocavities for optical trapping-assisted biosensing applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, **8**(7): 1901481.
- [13] Kaushik N K, Kaushik N, Linh N N, et al. Plasma and nanomaterials: Fabrication and biomedical applications [J]. *Nanomaterials*, 2019, **9**(1): 98.
- [14] Gromann S, Friedrich D, Karolak M, et al. Non-classical optical properties of mesoscopic gold [J]. *Physical Review Letters*, 2019, **122**(24): 246802.
- [15] Shokova M A, Bochenkov V E. Impact of Optical Cavity on Refractive Index Sensitivity of Gold Nanohole Arrays [J]. *Biosensors*, 2023, **13**(12): 1038.
- [16] Novotny L, Hecht B. Principles of Nano-Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
-
- (上接第 41 页)
- [14] Jiankai X, Bo S. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization [J]. *Journal of Supercomputing*, 2022, **79**(7): 7305–7336.
- [15] Pérez-armenta C, Ortega-Moñux A, Luque-gonzález M J, et al. Polarization-independent multimode interference coupler with anisotropy-engineered bricked metamaterial [J]. *Photonics Research*, 2022, **10**(4): 57–65.
- [16] K. S A, Sanjay H. A modified genetic algorithm and weighted principal component analysis based feature selection and extraction strategy in agriculture [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, **232**: 107460.
- [17] Mirjalili S, Lewis A. The Whale Optimization Algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, **95**: 51–67.
-