

### 改进鲸鱼优化算法的壁面红外反射特性求解

张潞 樊金浩 鲁宇轩 张磊 傅莉

#### Infrared reflection characteristics of the wall solved by improved whale optimization algorithm

ZHANG LU, FAN Jin-hao, LU Yu-xuan, ZHANG Lei, FU Li

引用本文:

张潞, 樊金浩, 鲁宇轩, 张磊, 傅莉. 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. doi: 10.37188/CO.2023–0095

ZHANG LU, FAN Jin-hao, LU Yu-xuan, ZHANG Lei, FU Li. Infrared reflection characteristics of the wall solved by improved whale optimization algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 595–604. doi: 10.37188/CO.2023–0095

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0095>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 表面损伤衍射双向反射分布函数模型建立及分析

Establishment and analysis of the diffraction bidirectional reflection distribution function model for surface defects

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(2): 375 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0162>

#### 空间目标地基观测红外辐射特性研究

Infrared radiation characteristics of space target based on ground-based detector

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(6): 1424 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0032>

#### 辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响

Influence of radiation coupling effect on polarization characteristics of targets

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(2): 318 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0035>

#### 一种基于定标的非均匀性校正改进算法

An improved non-uniformity correction algorithm based on calibration

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(3): 498 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0231>

#### 重投影优化的自由双目相机位姿估计方法

Pose estimation for free binocular cameras based on reprojection error optimization

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(6): 1400 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0105>

#### 基于单目视觉边缘频谱的散焦图像测距算法研究

An improved algorithm for monocular camera edge spectrum based ranging by defocused images

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(3): 627 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0171>

文章编号 2097-1842(2024)03-0595-10

## 改进鲸鱼优化算法的壁面红外反射特性求解

张 潞<sup>1</sup>, 樊金浩<sup>1</sup>, 鲁宇轩<sup>1</sup>, 张 磊<sup>2</sup>, 傅 莉<sup>1\*</sup>

(1. 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136;

2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:**壁面的红外反射特性由双向反射分布函数(BRDF)表征和求解。目前BRDF测量需要大量实验数据,同时存在精度不高的问题。通过构建壁面反射特性测试平台,使用MR170型傅立叶红外光谱辐射计获取2~15 μm波段下入射角度和各个反射角度的目标辐射亮度。针对隐身目标,应用RBF网络对3~5 μm以及8~14 μm波段的辐射亮度曲线进行拟合,排除大气干扰,进而求解出上述两个波段隐身目标的BRDF值。为了解决BRDF模型精度不高的问题,提出了改进的鲸鱼优化算法(IWOA),对BRDF模型参数进行反演,并设计了基于BRDF的反射率求解方法。IWOA对BRDF计算模型参数反演有良好的效果。根据反射法,应用所得到的BRDF数据求解得到的反射率为0.5496,相对误差为6.17%,满足工程需求。

**关键词:**双向反射分布函数(BRDF);鲸鱼优化算法;辐射亮度;参数反演

中图分类号:TN219

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2023-0095

## Infrared reflection characteristics of the wall solved by improved whale optimization algorithm

ZHANG LU<sup>1</sup>, FAN Jin-hao<sup>1</sup>, LU Yu-xuan<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, FU Li<sup>1\*</sup>

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

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

\* Corresponding author, E-mail: ffulli@163.com

**Abstract:** The infrared reflection characteristics of the wall are characterized and solved by the bidirectional reflectance distribution function (BRDF). BRDF measurement currently has two problems to be addressed: it requires much experimental data and accuracy is not high enough. By constructing the reflection characteristic test platform of the wall target, an MR170 Fourier infrared spectroradiometer was used to obtain the target radiance at the incident angle and each reflection angle in the 2–15 μm band. For the stealth target, the RBF network was used to fit the radiance at the bands of 3–5 μm and 8–14 μm to eliminate atmospheric interference. Then, the BRDF values of the stealth targets in the above two bands were obtained. To improve the accuracy of the BRDF model, an improved whale optimization algorithm (IWOA) was proposed to invert BRDF model parameters, and a reflectivity-solving method based on BRDF was designed. The IWOA has a good effect on the parameter inversion of the BRDF calculation model. According to the reflection method

收稿日期:2023-07-13; 修订日期:2023-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61074090); 辽宁省教育厅系列项目(No. JYT2020107)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61074090); Liaoning Provincial Department of Education Series Projects (No. JYT2020107)

and applying the obtained BRDF data, the reflectance 0.5496 and the relative error 6.17% are obtained, which meet the engineering requirements.

**Key words:** bidirectional reflectance distribution function (BRDF); whale optimization algorithm; radiance; parameter inversion

## 1 引言

Nicodemus 提出的双向反射分布函数 (BRDF)<sup>[1]</sup> 能够反映目标除几何特征外的全部光学特性。以双向反射分布函数为基础研究目标的光学特性一般需要构建合适的模型。海军航空大学宿德志等人以偏振双向反射分布函数模型为基础, 综合考虑辐射耦合效应, 建立目标偏振度计算模型, 在测量了不同温度和金属板夹角下的目标偏振特性后验证了该模型的正确性<sup>[2]</sup>。针对材料表面的反射特性, 国内外学者在理论基础之上, 根据不同材料的特性提出了针对不同材料 BRDF 特性的理论计算模型并加以验证。Schlick 模型通过表面粗糙度因子、各向同性因子以及反射系数反映材料表面真实的反射<sup>[3]</sup>。Phong 计算模型比较简单, 易于计算, 常用于计算机的图形处理方面, 但其计算高光部分的镜面反射时镜反射特征较小, 而且随角度变化衰减较快<sup>[4]</sup>。Cook-Torrance 模型认为只有在入射方向和反射方向的角平分线上对应的微平面对反射有贡献<sup>[5]</sup>。李铁等提出的四参数模型<sup>[6]</sup>、吴振森等提出的五参数模型<sup>[7-8]</sup>, 都具有很好的适应性, 由样片的实验数据基本可以优化出具体模型, 但形式较为复杂。目前, 材料 BRDF 值的计算往往需要大量实验数据支撑。为了解决此问题, 国内学者提出了 BRDF 模型参数的反演算法。但目前反演算法局限于遗传算法<sup>[9-10]</sup>、粒子群算法<sup>[11-12]</sup>等, 且精度有待进一步提高。针对上述问题, 本文提出了一种改进鲸鱼优化算法<sup>[13]</sup>对五参数 BRDF 模型的参数进行反演, 用于解决目前 BRDF 测量需要大量实验数据以及精度不高的问题。

## 2 双向反射分布函数模型

### 2.1 BRDF 理论模型

当光在不同粗糙程度材料表面产生反射时, 在目标材料的各个反射角度下会产生不同的现象, 将目标材料表面的反射情况分为 3 种情况: 镜面反射、漫反射以及介于两者之间的 BRDF 反

射, 3 种反射情况示意图如图 1 所示。

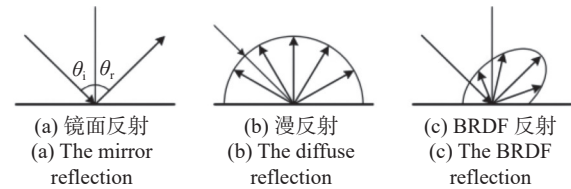


图 1 不同介质表面反射特性示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the surface reflection properties of the different media

实际上, 材料表面不存在完全的镜面反射或是漫反射, 上述两种情况均是针对材料表面的反射情况提出的理想物理模型<sup>[14]</sup>。几乎所有材料表面均既存在漫反射又存在镜面反射。针对这种反射特性, 学者们提出了一种双向反射分布函数 (BRDF)。BRDF 可以表示材料表面的反射特性, 受入射光波长、入射光角度、辐射亮度、反射光角度以及材料本身物理性质的影响, BRDF 原理图如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

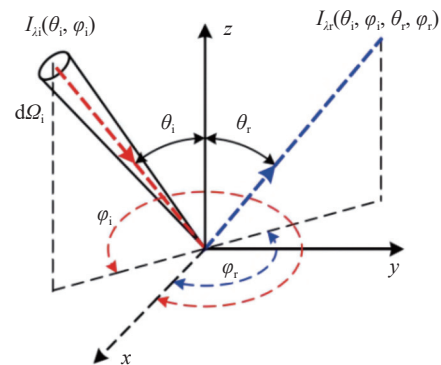


图 2 BRDF 计算原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the BRDF calculations

当一束光均匀投射到足够大的均匀且各项同性的材料表面上时, 材料表面的反射辐亮度与入射辐照度的比值即为 BRDF, 其数学表达式为:

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

式中,  $(\theta_i, \varphi_i)$  是入射天顶角和方位角;  $(\theta_r, \varphi_r)$  是出射天顶角和方位角;  $\lambda$  是波长;  $dL$  是面元经光源照射后在  $(\theta_r, \varphi_r)$  方向上反射的辐射亮度, 单位为  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ;  $dE$  是  $(\theta_i, \varphi_i)$  方向上的入射光在

材料表面产生的辐射照度, 单位为  $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ 。

### 2.2 五参数 BRDF 模型

对于壁面隐身目标模型, 最开始可用四参数 BRDF 模型表征其反射特性:

$$f = \frac{A}{\cos^m \theta_i} \exp(-\tan^2 \theta_r / s^2) + B \cos^m \theta_i \quad (2)$$

式中,  $A$  为镜像反射幅度系数,  $B$  为漫反射幅度系数,  $s$  为镜面反射系数,  $m$  为漫反射系数。但是这种模型一般认为探测器接收辐射方向与辐射入射方向相同, 为收发同路模型, 即  $\theta_i = \theta_r$ ,  $\varphi_i = \varphi_r$ , 因此无法描述被测目标的三维空间分布特性。

针对上述问题, 本文采用 Torrence-Sparrow 提出的五参数 BRDF 计算模型作为壁面隐身目标的 BRDF 经验模型来表征其反射特性:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_r} gR(2\beta, \hat{n}) \cdot \exp(-c^2 \alpha^2) + \frac{\rho_0}{\pi} \cos \theta_i \quad (3)$$

其主要思想是基于 BRDF 反射是介于镜面反射与漫反射两者之间的一种反射。因此将 BRDF 反射分为镜面反射与漫反射两个部分, 式 (3) 中第一项为镜面反射分量, 第二项为漫反射分量。式中,  $g$  为镜面反射系数,  $G$  为遮蔽函数,  $R$  为菲涅尔反射系数。指数项部分为待测表面粗糙度特征函数。如果将目标粗糙表面的起伏与斜率分布推广到非高斯分布的一般情况, 则第一项中的菲涅尔反射系数应写成

$$f_n(\alpha)R_0(\alpha) = \frac{k_r^2}{1 + (k_r^2 - 1) \cos^2 \alpha} \cdot \exp(b(1 - \cos \gamma)^2) \quad (4)$$

式中,  $f_n(\alpha)$  为法线上微小面元在倾斜角  $\alpha$  内的分布函数,  $R_0(\alpha)$  为待测面源局部菲涅尔反射系数, 可以用指数函数做近似模拟。对于各向同性表面, 可以将  $\varphi_i = 0^\circ$  时的所求值代替其余角度值下的求解结果。在五参数模型中, 测量角度处于大入射角和大观测角时, 相邻面元存在遮蔽和掩饰, 其余情况可以认为遮蔽函数为 1, 即无遮挡。那么原先的 BRDF 函数可以修正为:

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \times \exp[b(1 - \cos \gamma)^a] \times \frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i} \quad (5)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为待定参数,  $k_r$  为形容目标镜像程度参数, 目标镜像程度越突出, 其值越小。 $k_b$  为镜反射系数,  $k_d$  为漫反射系数,  $k_b + k_d \leq 1$ 。

此方法作为一种半经验统计模型, 需要通过实验数据对参数反演寻优, 且由于形式复杂, 算法的寻优能力将影响最终的模型精度。根据实验数据, 下文应用 IWOA 算法对上述参数进行反演, 得到目标反射特性曲线。

## 3 BRDF 数据获取

### 3.1 反射亮度测量系统

当壁面隐身目标被黑体辐射照射时, 其辐射能量会反射到法线方向的整个半球空间, 应用傅立叶光谱辐射计测量壁面样品不同天顶角  $\theta$  方向的反射辐射亮度测量系统如图 3 所示。

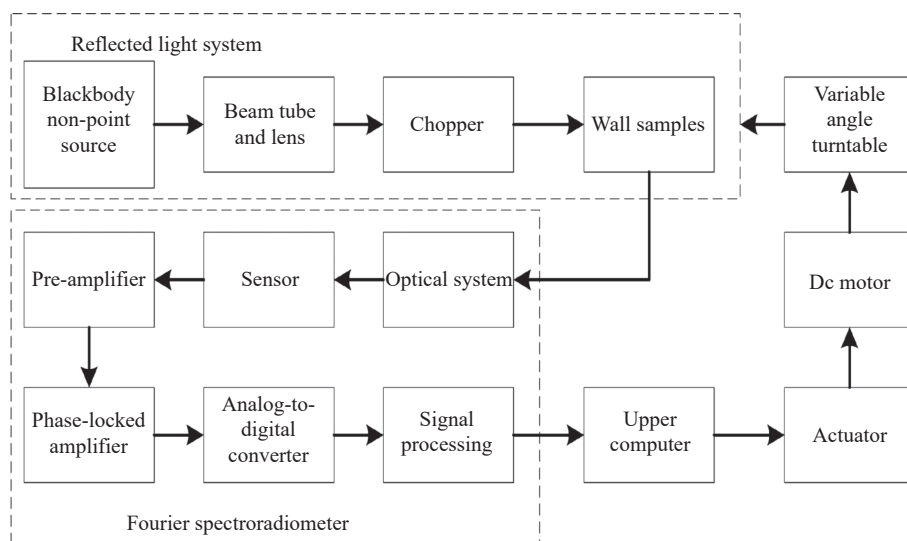


图 3 反射幅亮度测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the radiance measurement system

### 3.2 光谱辐射强度测量原理

迈克尔逊干涉仪内, 传感器上接收到的光线是相干光, 由于有光程差, 在传感器上会形成明暗交替的干涉条纹。若入射光线是波数为  $\nu$  的单色光, 开始时定镜和动镜与分光板距离相等, 当动镜匀速移动, 以动镜移动距离  $x$  为自变量, 以传感器接收到的辐射强度  $I$  为因变量, 则可获得辐射强度的余弦变化曲线  $I(x)$ :

$$I(x) = I(\nu) + I(\nu) \cos(2\pi\nu x) \quad (6)$$

若入射光是复合光, 则对波数  $\nu$  积分可得传感器上的辐射强度  $I(x)$ :

$$I(x) = \frac{1}{2} I_0 + \int_0^\infty I(\nu) \cos(2\pi\nu) d\nu \quad (7)$$

式中,  $I_0$  是光程差为 0 时所有波数的相干辐射强度, 由于是半区间积分, 所以有二分之一因子。由此干涉曲线获取的光谱辐射为:

$$I(\nu) = 4 \int_0^\infty \left[ I(x) - \frac{I_0}{2} \right] \cos(2\pi\nu) dx \quad (8)$$

### 3.3 BRDF 测量模型

根据普朗克定律, 黑体的光谱辐射出射度  $M_{\lambda bb}$  为:

$$M_{\lambda bb} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} \quad (9)$$

式中,  $\lambda$  是波长,  $T$  是绝对温度,  $c$  是光速,  $h$  是普朗克常数,  $k$  是玻尔兹曼常数。式 (9) 可进一步表

示为

$$M_{\lambda bb} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \quad (10)$$

式中,  $c_1$  是第一辐射常数,  $c_2$  是第二辐射常数, 其中:  $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^8$ ;  $c_2 = hc/k = 1.43879 \times 10^4$ 。黑体在某一波段上的全辐射出射度  $M_{bb}$  为光谱辐射出射度  $M_{\lambda bb}$  对波长  $\lambda$  的积分, 即

$$M_{bb} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda bb} d\lambda \quad (11)$$

通过光束整形操作使黑体面源的辐射为平行光束, 当用黑体光源对反射源进行照射时, 其辐射照度  $E_i$  就是黑体的出射度  $M_{bb}$ , 应用傅立叶光谱辐射计测得所需的辐射亮度。得到入射方向与各个出射角度的辐射亮度测试数据, 通过式 (1) 即可得到隐身目标模型的 BRDF 分布。

### 3.4 BRDF 数据获取

应用所设计的反射亮度光路测得所需的辐射亮度数值, 取  $\varphi_i = 0^\circ$ ,  $\varphi_r = 180^\circ$ , 得到入射角度与各个出射角度的辐射亮度测试数据。由于在以  $3.15 \mu\text{m}$ 、 $4.3 \mu\text{m}$ 、 $9.4 \mu\text{m}$ 、 $10.4 \mu\text{m}$  为中心波长的红外波段处, 测量结果会受到大气中水和二氧化碳吸收作用所导致的大气窗口的干扰, 故将相应的大气吸收特征波段测得的辐射亮度数据用 RBF 网络拟合<sup>[9]</sup>, 达到排除大气窗口干扰的目的。入射方向的辐射亮度拟合结果见图 4。将拟合得到的辐射亮度结果与辐射出射度数据带入式 (1) 得到各观测角度的 BRDF 值, 见图 5。

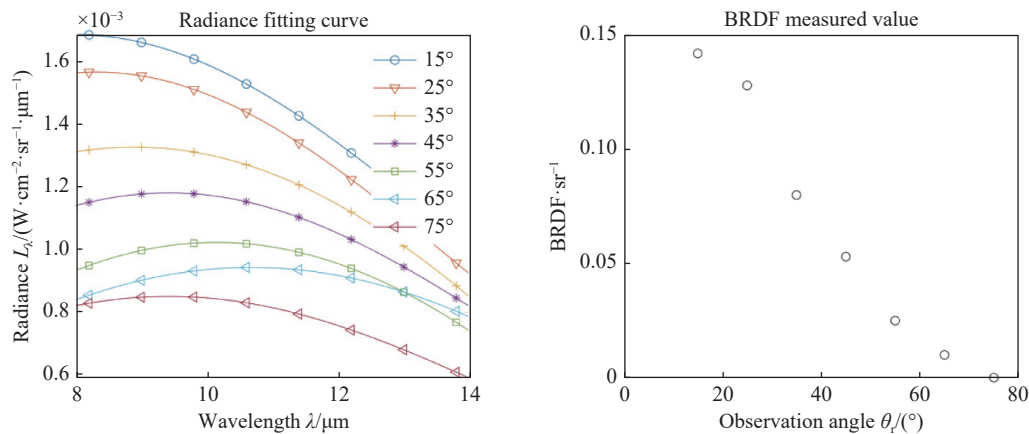


图 4 3~5  $\mu\text{m}$  波段反射亮度及 BRDF 测量值

Fig. 4 Reflection brightness and BRDF measurements in 3~5  $\mu\text{m}$  bands

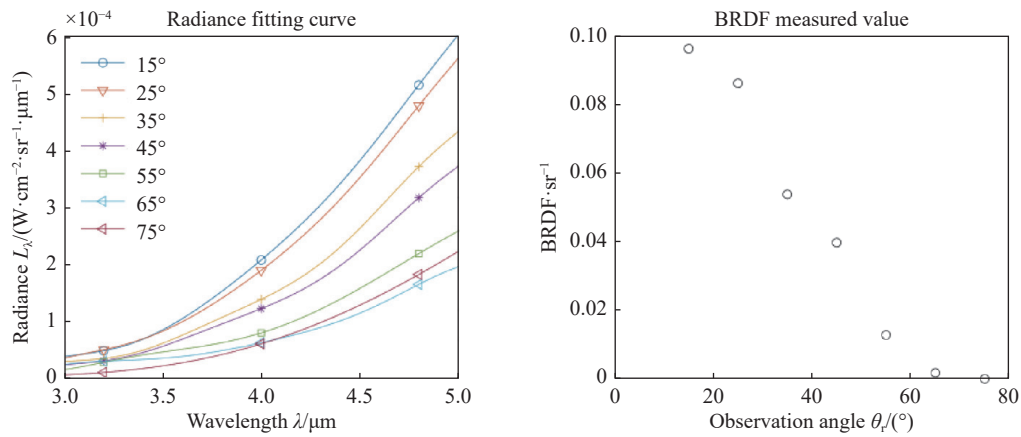


图 5 8~14 μm 反射亮度及 BRDF 测量值

Fig. 5 Reflection brightness and BRDF measurements in 8~14 μm bands

## 4 改进鲸鱼优化算法

### 4.1 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法是一种群体智能优化算法。其模拟座头鲸吐出一张气泡网, 将目标食物驱逐至近水面处的气泡网中心, 最终捕食鱼虾的行为, 主要包括收缩包围、气泡网狩猎及猎物搜索三部分, 原理图如图 6 所示。

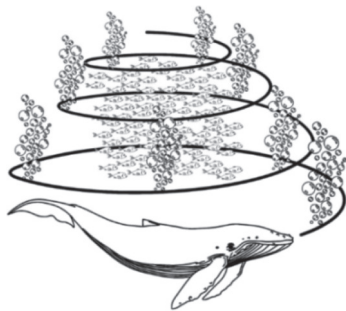


图 6 座头鲸螺旋上升捕食方法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the humpback whale's ascending spiral predation method

#### (1) 收缩包围

座头鲸可以识别猎物的位置, 并对其进行包围。本算法将本代最优解位置作为下一代搜索的模糊位置。其数学表达如下:

$$D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (12)$$

$$X(t+1) = X^*(t) - A \cdot D \quad (13)$$

$$A = 2a_t \cdot r_1 - a_t \quad (14)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (15)$$

式中,  $D$  表示选中的任意鲸鱼个体与搜索个体之间的欧氏距离,  $t$  为当前迭代次数,  $A$ 、 $C$  均为系数常量,  $X^*(t)$  为当前最优解的位置向量;  $X(t)$  当前搜索代中的位置向量,  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数,  $a_t$  为收敛因子, 随着迭代次数的增加,  $a_t$  值不断减小,  $A$  的波动范围也随之减小, 从而模拟鲸鱼捕食时包围圈逐渐收缩的现象。每当迭代中出现比当前最优解更优的解  $X(t)$ , 则更新这个解为最优解  $X^*(t)$ 。

#### (2) 气泡网狩猎

气泡网狩猎为螺旋位置更新。首先利用目标猎物与鲸鱼之间的距离计算得到螺旋形路径, 其中,  $A$  可以是  $[-1, 1]$  间的任意位置。螺旋位置更新公式为:

$$X(t+1) = D \cdot e^{r_l} \cos(2\pi l) + X^*(n) \quad (16)$$

式中,  $D$  为本代最优解与上一代最优解的鲸鱼之间的距离,  $r$  定义为对数螺旋线形状的常数 1,  $l$  为  $[-1, 1]$  之间的随机值。

#### (3) 猎物搜索

鲸鱼个体通过随机选取的个体完成对猎物的搜索过程, 模型定义为:

$$X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - A \cdot |C \cdot X_{\text{rand}}(t) - X(t)| \quad (17)$$

式中,  $X_{\text{rand}}$  为当前种群中随机选取的搜索代理的位置向量。

## 4.2 改进方法

### (1) 惯性权重的引入

标准鲸鱼优化算法没有惯性权重概念<sup>[15]</sup>, 为适应算法在不同阶段的需要, 即前期能增强全局搜索能力, 尽可能地囊括全局最优解的位置; 后期加快算法收敛速度并提高解的精度。因此在标准鲸鱼优化算法的基础上引入惯性权重  $\omega$ , 其表达式为:

$$\omega = 1 - e^{-(N_{\max} - n)/N_{\max}}, \quad (18)$$

式中,  $n$  为当前迭代次数,  $N_{\max}$  为最大迭代次数。根据惯性权重对鲸鱼优化算法的收缩包围机制及螺旋更新机制模型进行更新, 得到改进后的位置更新公式为:

$$X(n+1) \begin{cases} \omega \cdot X^*(n) - A \cdot D \\ D \cdot e^{bl} \cos(2\pi l) + \omega \cdot X^*(n) \end{cases}. \quad (19)$$

### (2) 收敛因子的非线性改进

由 WOA 算法的计算过程可知, 当  $|A| > 1$  时, 鲸鱼个体对目标实行收缩包围机制, 根据公式 (12)、(13) 更新其位置, 完成局部开发, 此时算法具有较强的搜索能力。当  $|A| \leq 1$  时, 鲸鱼个体对猎物进行搜索, 将依据式 (19) 更新位置, 完成全局搜索过程, 此时算法具有较好的开发能力。而  $A$  值大小则受收敛因子  $a_t$  影响, 即鲸鱼优化算法的  $a_t$  值可以决定算法处于局部开发还是全局搜索过程。经典 WOA 算法中, 收敛因子  $a_t$  将从 2 线性减小至 0。这说明迭代初期收敛因子取极大值, 此时步长最大, 可以实现全局搜索。随着收敛因子  $a_t$  的取值变小, 探测步长也逐渐减小, 可以实现局部搜索, 这时算法是收敛的。在鲸鱼优化算法中, 其搜索过程是非线性变化的, 但收敛因子  $a_t$  随着迭代次数的增加而递减, 该过程却是线性的, 所以改进鲸鱼优化算法是利用一种非线性收敛因子递减方式来优化搜索过程的, 定义为:

$$a_t = (a_i - a_f) \times \left( \frac{T_{\max} - t}{t} \right)^{1/2}, \quad (20)$$

式中,  $a_i$  和  $a_f$  分别为收敛因子的初值和终值, 改进后的 WOA 算法流程图如图 7 所示。

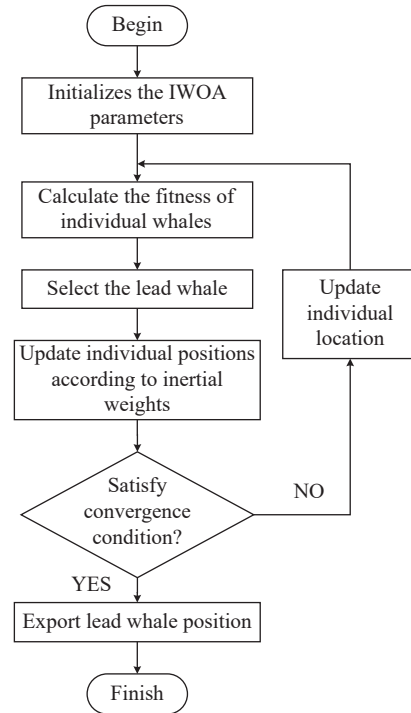


图 7 IWOA 算法流程图

Fig. 7 IWOA algorithm flow chart

## 5 双向反射分布函数参数反演

### 5.1 参数反演

目标表面的 BRDF 计算模型参数反演是一个逆问题的求解过程。取图 4 和图 5 中测量数据, 利用公式 (1) 求得各观测角度下的波长与 BRDF 的关系。通过对 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  的光谱辐射亮度积分, 将得到的结果作为真实值, 将真实值代入五参数 BRDF 计算模型中。应用上文的改进 WOA 算法进行计算, 将个体数目设为 20, 最大遗传代数设为 50, 经过多次迭代反求出公式中的参数。以 3~5  $\mu\text{m}$  波段为例, 改进前后的适应度曲线如图 8 (彩图见期刊电子版) 所示。

由图 8 可以清楚看出, 改进后的算法在收敛速度等方面有明显提升。得到的 IWOA 反演结果与真实值结果对比如图 9、10 所示。

通过 IWOA 参数重建的模型参数如下: 3~5  $\mu\text{m}$  波段的反演结果为  $k_b=0.8476$ ,  $k_r=2.2059$ ,  $k_d=0.0326$ ,  $a=1.4855$ ,  $b=0.7879$ ; 8~14  $\mu\text{m}$  波段的反演结果为  $k_b=0.8704$ ,  $k_r=0.4045$ ,  $k_d=0.1122$ ,  $a=0.9253$ ,  $b=1.6367$ 。为验证 IWOA 在 BRDF 模型参数重建中的优越性, 将 IWOA、遗传算法、粒子群算法

对五参数模型的反演结果与真实值进行对比, 对比图如图 11、12 所示。

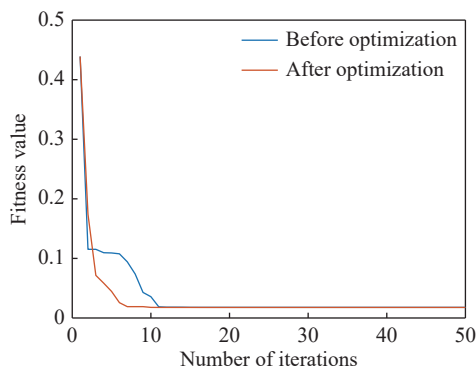


图 8 3~5 μm 波段 IWOA 模型改进效果图

Fig. 8 Improved effect of the IWOA model in the 3~5 μm band

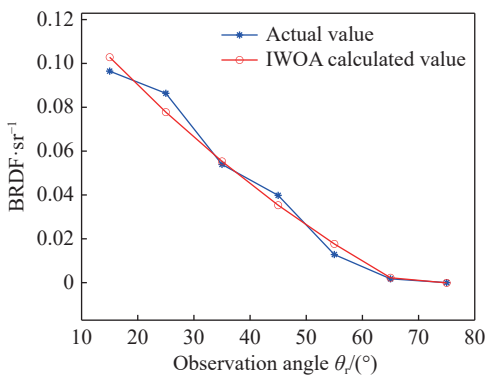


图 9 3~5 μm 波段 IWOA 模型反演结果对比

Fig. 9 Comparison of the inversion results of the IWOA model in the 3~5 μm band

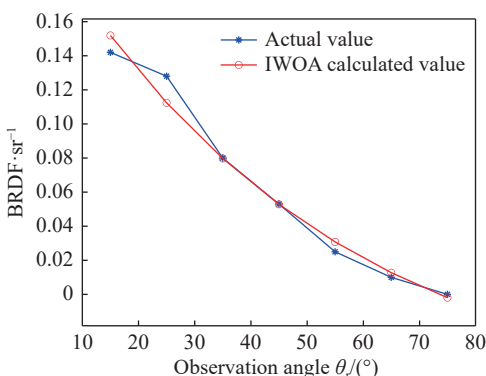


图 10 8~14 μm 波段 IWOA 模型反演结果对比

Fig. 10 Comparison of the inversion results of the IWOA model in the 8~14 μm band

其中, 以 3~5 μm 波段为例, 遗传算法反演得到的模型参数为  $k_b=0.8452, k_r=2.1921, k_d=0.1487, a=0.6482, b=0.0394$ , 粒子群算法反演得到的模型参数为  $k_b=0.9083, k_r=2.2004, k_d=0.0987, a=0.8421, b=0.0360$ 。8~14 μm 波长下, 遗传算法反演得到

的模型参数为  $k_b=0.9008, k_r=0.6051, k_d=0.0771, a=1.0757, b=0.2579$ 。粒子群算法反演得到的模型参数为  $k_b=0.5773, k_r=0.8194, k_d=1.0938, a=1.6846, b=0.1647$ 。

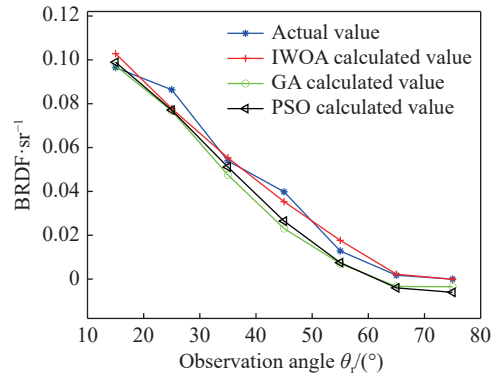


图 11 3~5 μm 波段 3 种算法反演结果与真实值对比

Fig. 11 Comparison of the inversion results of three algorithms and actual values in the 3~5 μm band

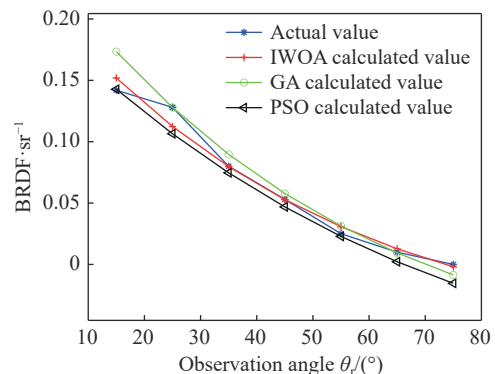


图 12 8~14 μm 波段 3 种算法反演结果与真实值对比

Fig. 12 Comparison of the inversion results of three algorithms and actual values in the 8~14 μm band

从图 11~图 12 可以看出, IWOA 与目标函数拟合结果吻合度高, 可以更好地对五参数 BRDF 模型参数进行反演。将 IWOA 反演得到的参数代入五参数 BRDF 模型中, 得到隐身目标模型的 BRDF 反射特性曲线如图 13、图 14 所示。

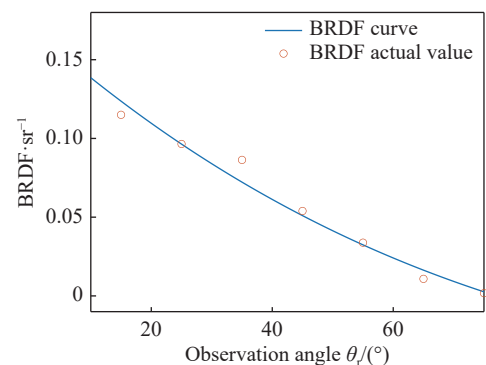


图 13 3~5 μm 波段反射特性曲线

Fig. 13 Reflection characteristic curve in 3~5 μm bands



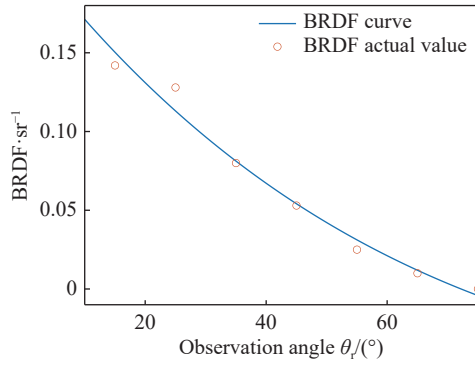


图 14 8~14 μm 波段反射特性曲线

Fig. 14 Reflection characteristic curve in 8~14 μm bands

## 5.2 误差分析

为了进一步评估 IWOA 的性能,选择了两种常用的预测误差度量方法:绝对平均误差 (MAE) 以及回归系数的平方 ( $R^2$ ),两种误差度量方法的表达式为

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - \hat{y}_i}{N}, \quad (21)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}. \quad (22)$$

MAE 是绝对误差的平均值,能更好地反映预测值误差的实际情况,MAE 值越小,表明模型的预测误差越小。 $R^2$  用于评估样本预测值与真实值之间的相关程度, $R^2$  越接近于 1,则预测值与真实值之间的相关程度越好。

将 IWOA、遗传算法 (GA)<sup>[16]</sup> 与粒子群算法 (PSO)<sup>[17]</sup> 对五参数 BRDF 计算模型的拟合结果代入上述误差计算公式,结果见表 1。

表 1 误差计算结果

Tab. 1 Error calculation results

误差函数	3~5 μm		
	IWOA	GA	PSO
MAE( $10^{-3}$ )	4.4	8	7.5
$R^2$	0.9828	0.9494	0.9606
8~14 μm			
MAE( $10^{-3}$ )	6.1	10.3	9.8
$R^2$	0.9797	0.9369	0.9574

由表 1 可知,IWOA 反演结果的误差低于传统遗传算法与粒子群算法。3~5 μm 波段,IWOA 的 MAE 值为  $4.4 \times 10^{-3}$ ,低于遗传算法的  $8 \times 10^{-3}$  与粒子群算法的  $7.5 \times 10^{-3}$ 。8~14 μm 波段,IWOA 的  $R^2$  值为 0.9797,高于遗传算法的 0.9369 与粒子群算法的 0.9574。IWOA 可以更好地对五参数 BRDF 模型的参数进行反演,验证了 IWOA 对解决五参数 BRDF 模型参数反演问题的准确性以及优越性。

## 6 基于反射法的反射率求解

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  $E_i$  的比值,即

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

当用黑体光源对反射源进行照射时,在光束整形后,其辐射照度  $E_i$  就是黑体的出射度  $M_{bb}$ ,于是可得反射率计算公式:

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

光源垂直入射目标壁面的反射亮度包线如图 15 所示。

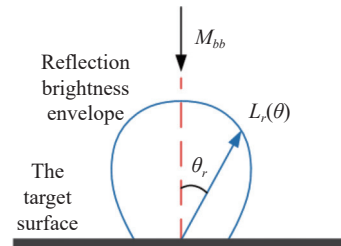


图 15 光源垂直入射目标壁面的反射亮度包线

Fig. 15 The reflected brightness envelope when the light source incidents vertically on the wall

由于在实际测量实验中,难以对各  $\theta$  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  $\theta$  角方向分为  $n$  份, $\theta_k$  为各份的中心角度, $\theta_{k1}$  和  $\theta_{k2}$  分别为各份的下限和上限。获得反射率计算公式的离散形式,

$$\rho = \frac{M_r}{M_{bb}} = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{\phi} \int_{\theta_{k1}}^{\theta_{k2}} L_r(\theta_k) \sin\theta d\phi d\theta}{M_{bb}}. \quad (25)$$

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

$$\rho = \frac{M_r}{M_{bb}} = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{\phi} \int_{\theta_{k1}}^{\theta_{k2}} (L_r(\theta_k) - L_g) \sin\theta \, d\phi d\theta - M_g}{M_{bb}} \quad (26)$$

此方法为反射法求解发射率, 在无法对目标加热时应用此方法即可对目标的发射率进行间接求解。由于并非直接求解, 故误差会偏大。结合上述公式, 应用反射法计算出壁面隐身目标的垂直入射方向在两个大气窗口内的平均反射率, 结果为 0.5496, 进一步求得发射率结果为 0.4504, 其与壁面样品理论发射率之间的相对误差为 6.17%。

## 7 结 论

本文应用 MR170 红外光谱辐射计, 搭建了壁

面隐身目标反射亮度测量实验系统。对壁面隐身目标入射红外光谱辐射亮度以及不同出射角度的红外光谱辐射亮度值进行测量。基于双向反射分布函数的定义对 BRDF 值进行计算。将计算值作为真实值, 提出了一种改进鲸鱼算法的五参数 BRDF 模型的参数反演方法。此方法在 WOA 算法的基础上, 引入了惯性权重的概念, 并将收敛因子更换成了非线性的形式, 得到五个参数结果分别为  $k_b=0.8476$ ,  $k_r=2.2059$ ,  $k_d=0.0326$ ,  $a=1.4855$ ,  $b=0.7879$ 。IWOA 相较于 WOA 精度得到了提升, 且 IWOA 对五参数模型参数反演的精确度高于传统算法。对壁面隐身目标 BRDF 模型参数反演得到其 BRDF 反射特性曲线后, 对壁面隐身目标的反射率进行求解, 结果为 0.5496, 与壁面隐身目标样品理论反射率之间的相对误差为 6.17%。以上工作对壁面隐身目标反射特性的进一步研究提供了帮助。

## 参考文献:

- [1] NICODEMUS F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [2] 宿德志, 刘亮, 吴世永, 等. 辐射耦合效应对目标红外偏振特性的影响[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 318-328.  
SU D ZH, LIU L, WU SH Y, et al.. Influence of radiation coupling effect on polarization characteristics of targets[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 318-328.
- [3] SCHLICK C. A customizable reflectance model for everyday rendering[C]. *Proceedings of the Fourth Eurographics Workshop on Rendering*, 1993.
- [4] PHONG B T. Illumination for computer generated pictures[J]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317.
- [5] COOK R L, TORRANCE K E. A reflectance model for computer graphics[C]. *Proceedings of the 8th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 1981: 307-316, doi: 10.1145/800224.806819.
- [6] 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.  
LI T, WANG H Y, WANG H J. Application of genetic simulated annealing algorithm in BRDF statistical modelling[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, 25(4): 489-492.
- [7] 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.  
WU ZH S, XIE D H, XIE P H, et al.. Genetic algorithm for statistical modeling of laser scattering on rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 897-901.
- [8] 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): 0229001.  
YANG Y F, WU ZH S, CAO Y H. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0229001. (in Chinese).
- [9] 杨敏, 方勇华, 吴军, 等. 基于 Kubelka-Munk 理论的涂层表面多参量偏振双向反射分布函数模型[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0126002.  
YANG M, FANG Y H, WU J, et al.. Multiple-component polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces based on Kubelka-Munk theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0126002. (in Chinese).
- [10] 李明哲, 赵继广, 杨帆. 基于统计与遗传算法的 Cook-Torrance 模型研究[J]. *装备学院学报*, 2016, 27(1): 116-121.  
LI M ZH, ZHAO J G, YANG F. Analysis on cook-Torrance model based on genetic algorithm and statistical method[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2016, 27(1): 116-121.
- [11] 孙建平, 齐宏, 王申领, 等. 随机惯性权重微粒群算法的 BRDF 参数反演[J]. *激光杂志*, 2021, 42(2): 5-9.

- SUN J P, QI H, WANG SH L, *et al.*. BRDF parameter inversion based on the stochastic inertia weight particle swarm optimization algorithm[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(2): 5-9.
- [12] LIU Y Y, DAI J J, ZHAO S S, *et al.*. Optimization of five-parameter BRDF model based on hybrid GA-PSO algorithm[J]. *Optik*, 2020, 219: 164978.
- [13] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95: 51-67.
- [14] 罗一甲, 祝赫, 李潇涵, 等. 赤霞珠酿酒葡萄总酚含量的近红外光谱定量分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(7): 2036-2042.
- LUO Y J, ZHU H, LI X H, *et al.*. Quantitative analysis of total phenol content in cabernet sauvignon grape based on near-infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(7): 2036-2042.
- [15] DING H Q, WU ZH Y, ZHAO L CH. Whale optimization algorithm based on nonlinear convergence factor and chaotic inertial weight[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2020, 32(24): e5949.
- [16] ADITYA SHASTRY K, SANJAY H A. 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] ZHANG X M, LIN Q Y. Three-learning strategy particle swarm algorithm for global optimization problems[J]. *Information Sciences*, 2022, 593: 289-313.

#### 作者简介:



张 潞(1972—), 女, 辽宁西丰人, 硕士, 沈阳航空航天大学讲师, 主要研究方向为无线网络安全、密码学、飞行器隐身测试与智能控制等。E-mail: [1046094731@qq.com](mailto:1046094731@qq.com)



傅 莉(1968—), 女, 辽宁海城人, 博士, 教授, 主要研究方向飞行器隐身测试与智能控制。E-mail: [ffulli@163.com](mailto:ffulli@163.com)