

# 分层均匀粒子散射特性的异常衍射近似方法

俞雪平<sup>1,2</sup> 胡云安<sup>3</sup> 刘亮<sup>3</sup> 谢永兴<sup>1</sup> 王亚蛟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264000

<sup>2</sup>92914部队, 海南 临高 571800

<sup>3</sup>海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264000

**摘要** 自然环境中存在大量各种各样的悬浮颗粒, 有关粒子散射特性的研究具有广泛的应用价值。现有的理论计算较为复杂, 且研究对象多为均匀球体模型, 忽略了粒子内部组成结构的差异。通过分析双层均匀球体模型消光效率和吸收效率的计算过程, 将异常衍射近似方法扩展到多层均匀粒子, 并给出相应的误差比较, 说明该方法的实用性。以海洋浮游微生物为例, 着重讨论了双层均匀粒子具有不同内外球体参数以及内球和外球中心偏离情况的散射特性。仿真结果表明除了尺寸、折射率等参数, 粒子的不均匀结构对前向散射也有作用, 当内外球体参数相差较大时, 有必要考虑结构因素对散射特性的影响。

**关键词** 散射; 分层均匀粒子; 异常衍射近似; 消光效率和吸收效率; 海洋浮游微生物

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0129002

## Anomalous Diffraction Approximation for the Scattering Properties of Stratified Homogeneous Particles

Yu Xueping<sup>1,2</sup> Hu Yun'an<sup>3</sup> Liu Liang<sup>3</sup> Xie Yongxing<sup>1</sup> Wang Yajiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate Students' Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264000, China

<sup>2</sup>92914 Troop, Lingao, Hainan 571800, China

<sup>3</sup>Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264000, China

**Abstract** There are many kinds of suspended particles in natural environment, and research on scattering characteristics of particles has extensive application value. The existing theoretical calculation is complex, and it is often based on assuming a homogeneous composition sphere model without the difference of particle's internal composition structure. Through the analysis of calculation for extinction and absorption efficiency of two-layered homogeneous sphere model, the anomalous diffraction approximation method is extended to multilayered homogeneous particle model. The corresponding error comparison illustrates the usefulness of the method. The scattering properties of two-layered homogeneous particles with different internal and external sphere parameters and offcenter deviations are discussed by taking marine plankton as an example. The simulation results show that except for size and refractive index, particle heterogeneous structure also plays a role on the forward scattering. When the difference between inner and outer sphere parameters is large, it is necessary to consider the influence of structural factors on the scattering properties.

**Key words** scattering; stratified homogeneous particle; anomalous diffraction approximation; extinction efficiency and absorption efficiency; marine plankton

**OCIS codes** 290.5825; 290.5850; 010.4458

收稿日期: 2014-08-07; 收到修改稿日期: 2014-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(61205206)

作者简介: 俞雪平(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事目标探测与模式识别方面的研究。E-mail: yxpsf@126.com

导师简介: 胡云安(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事控制理论与模式识别方面的研究。E-mail: haya507@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

## 1 引 言

光在传播过程中遇到散射物体时,会偏离原来的方向引起光强的重新分布,发生散射现象。散射光包含了散射体的特征信息,是了解微观世界的重要手段,也是影响观察宏观世界的主要因素。随着激光技术的成熟,带动了相关学科的发展,光散射成为当下研究的热点,在光学成像、空间测量、环境监测、目标探测、医学诊断等方面应用广泛。例如,大气和海洋中的悬浮颗粒对空气和水体的吸收系数和散射系数等固有光学特性起主要作用,是大气和海洋科学的重点考察内容<sup>[1-3]</sup>。目前国内对粒子光学特性的研究因实验条件和测量设备的限制,缺乏实测数据,而理论计算可以弥补这方面的不足<sup>[4]</sup>。现有的光散射理论有许多,洛伦兹和米氏理论在计算均匀球形粒子中最为典型<sup>[5]</sup>,散射传输矩阵法可以处理旋转对称的非球形粒子<sup>[6]</sup>,离散偶极子法用于复杂外形小粒子的精确逼近<sup>[7]</sup>,几何光学法用于大粒子的高频近似<sup>[8]</sup>,它们在求解任意形状大尺度粒子散射时普遍计算繁琐,占用大量的时间和内存资源。而在大多数情况下,一般可以找到合适的等效粒子,采用近似的方法来满足实际工程应用的需要<sup>[9]</sup>。Van de Hulst<sup>[10]</sup>提出的异常衍射近似(ADA)作为一种小散射角范围内近似估计的有效方法具有原理简单、计算方便等特点。异常衍射近似适用于低折射率、大粒径的光学软粒子条件,鉴于现实世界中大部分粒子符合此要求,该方法是可靠易行的。为了减小异常衍射近似的计算误差并扩大使用范围,许多改进方法不断涌现<sup>[11-12]</sup>。本文利用异常衍射近似考察海水中粒子的散射特性,加深对海水光学性质的认识。

粒子的光散射受到粒径大小、介质折射率、形状等因素的影响,相应的研究成果也很多<sup>[13-15]</sup>。但粒子结构组成对光散射影响的研究仅限于均匀轴对称的等效球模型<sup>[16]</sup>,而自然环境中真实情况要复杂得多,到处都是形状各异、种类繁多的悬浮颗粒。像海洋中除了较为均匀的无机物质外,还存在大量包含叶绿体和液泡的微藻、单细胞的细菌以及有机碎屑等悬浮体<sup>[17]</sup>,且多是覆膜或者含核的混合结构,都具有不规则的外部形状和不均匀的内部构造<sup>[18]</sup>,它们的散射特性与均匀球体粒子也不完全相同。一些学者对此进行了研究,Aden等<sup>[19]</sup>较早地进行了非均匀球体粒子光学特性的模拟研究,Bricaud等<sup>[20-21]</sup>运用分层球体散射模型研究了藻类细胞的散射特性,并对模型进行了实验验证,但复杂的细胞结构和不同的粒径分布也加大了模拟的难度。为了更好地模拟粒子的混合成分和层次结构,本文基于异常衍射近似,将其推广应用于多层粒子模型,提出扩展异常衍射近似算法(EADA),重点讨论分层均匀的双层球体粒子在不同尺度以及内外球体共心和偏心情况下的散射特性。

## 2 理论模型与计算方法

### 2.1 均匀粒子的异常衍射近似

异常衍射近似可以由菲涅耳衍射理论导出,用于粒子消光效率和吸收效率的光谱模拟以及粒径反演等在线求解场合<sup>[22-23]</sup>。为了保证计算精度,它要求粒子满足大尺度和折射率接近1,即  $x = 2\pi r/\lambda \gg 1$  和  $|m - 1| \ll 1$  两个前提条件,其中, $x$ 为有效尺度参数, $r$ 为粒子半径, $\lambda$ 为入射光波长, $m$ 为粒子相对于周围介质的折射率。在上述条件限制下,可以忽略反射光和折射光,认为通过粒子的散射光线传播方向保持不变,只是相位上存在变化,因此粒子的消光主要是由经过粒子内部的光线和粒子外部的光线相互干涉引起的。

根据异常衍射理论,前向散射振幅函数为

$$S(0) = \frac{k^2}{2\pi} \iint_P [1 - \exp(-i\phi)] dP, \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  为真空中的波数, $P$ 为粒子垂直于入射光方向的投影面积,  $\phi = (m - 1)kl$  为相位延时,其中,  $m = m_r - im_i$  为介质的复相对折射率, $l$ 为光线在粒子中的传播距离。

根据光学定理,粒子的消光效率可以表示为

$$Q_{ad} = \frac{4\pi}{k^2 P} \text{Re}[S(0)], \quad (2)$$

式中  $\text{Re}$  表示取  $S(0)$  的实部。这样通过转化,可以利用积分运算实现粒子消光效率的快速求解。

经典的异常衍射近似计算的消光效率估计值与理论计算的真实值在变化趋势上保持一致,准确反映了

极值位置,包含正确的极限值。尽管如此,近似值相比精确值偏低,在粒子折射率较大或尺寸远大于入射光波长时尤其明显。随着折射率的增大,异常衍射近似计算的消光效率误差增大。这是忽略光线的偏折和粒子边缘的弯曲对入射光的影响导致的结果,因为较大的相对折射率不满足异常衍射近似对粒子折射率的要求,同时,不能把粒子的边缘看成明显与周围介质不同<sup>[24]</sup>。通过考虑边界效应,补偿其对消光效率的影响可以放宽异常衍射近似的条件限制,改善计算精度。

根据琼斯的研究,被任意偏振的入射光照射的随机朝向凸状粒子,其边界效应对消光效率的影响可以表示为

$$Q_{\text{edge}} = \frac{c_0}{k^{2/3} P_B} \int R^{1/3} ds, \quad (3)$$

式中  $c_0=0.996193$  为折射系数,  $B$  为粒子垂直于入射光方向的投影轮廓边界,  $R$  为粒子投影轮廓边界的曲率半径,  $ds$  表示围绕粒子投影轮廓边界  $B$  上的曲线积分。

对于均匀不规则粒子,可以是椭球体、圆柱体等各种形状,都有相应的异常衍射近似计算公式。考虑椭球体模型,令  $K(z) = \frac{1}{2} + \frac{\exp(-z)}{z} + \frac{\exp(-z) - 1}{z^2}$ , 消光效率、吸收效率和散射效率的解析表达式分别为

$$Q_{\text{ext}} = 4 \operatorname{Re}[K(i\rho)] = 2 - 4 \frac{\cos\beta}{\rho_r} \exp(-\rho_r \tan\beta) \sin(\rho_r - \beta) - 4 \left( \frac{\cos\beta}{\rho_r} \right)^2 \exp(-\rho_r \tan\beta) \cos(\rho_r - 2\beta) + 4 \left( \frac{\cos\beta}{\rho_r} \right)^2 \cos(2\beta), \quad (4)$$

$$Q_{\text{abs}} = 2K(\operatorname{Im}[2\rho]) = 2K(\rho_i), \quad (5)$$

$$Q_{\text{sca}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{abs}}, \quad (6)$$

式中  $\rho = 2ka(m-1)/g$ ,  $\rho_r = 2ka(m_r-1)/g$ ,  $\rho_i = 4kam_i/g$ ,  $\tan\beta = \frac{m_i}{m_r-1}$ , 其中,  $g = (\cos^2\theta + u^2 \sin^2\theta)^{1/2}$  为椭球不对称因子,  $\theta$  为入射光方向与椭球的对称轴的夹角,  $u = a/b$  为椭球的半径比,  $a$  为椭球的旋转半径,  $b$  为椭球的赤道半径,  $u$  大于、等于和小于 1 分别对应扁长椭球、圆球和扁平椭球。

由于粒子边缘导致的边界效应对消光效率的影响可以表示为

$$Q_{\text{edge}} = \frac{4c_0 u^{2/3}}{\pi(kb)^{2/3} g^2} \int_0^{\pi/2} (\sin^2\omega + g^2 \cos^2\omega)^{2/3} d\omega, \quad (7)$$

式中  $\omega$  为投影区域的角度参数。当  $g=1$ , 粒子为圆球时, 边界效应简化为  $Q_{\text{edge}} = \frac{2c_0}{(ka)^{2/3}}$ 。

## 2.2 分层均匀粒子的异常衍射近似

任意形状的粒子都可以用等效球体模型代替,以双层球体模型为研究对象,假设波数  $k = 2\pi m_0/\lambda$ ,  $m_0$  为周围介质折射率。外球相对折射率  $m_1 = n_1 - in_1'$ , 内球相对折射率  $m_2 = n_2 - in_2'$ , 体积等效相对折射率  $m_e = q^3 m_1 + (1-q^3)m_2$ 。外球半径  $r_1 = a$ , 内球半径  $r_2 = b$ , 比例  $q = r_2/r_1 \in [0, 1]$ ,  $w$  为垂直于入射光线的内球投影中心偏离外球投影中心的距离,  $P_1$  为垂直于入射光线的外球投影区域,  $P_2$  为垂直于入射光线的内球投影区

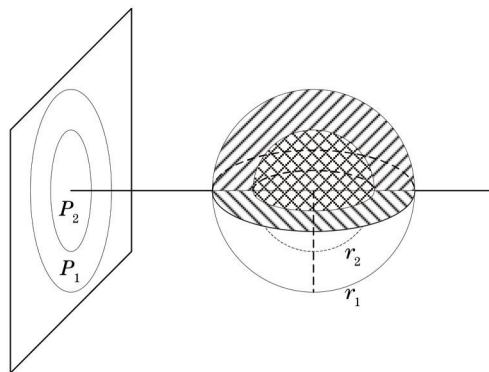


图1 双层均匀球体模型几何示意图

Fig.1 Geometry of a two-layered homogeneous spherical model

域,  $l_1$  为光线经过外球的传播距离,  $l_2$  为光线经过内球的传播距离。图 1 为双层均匀球体模型的几何示意图。

双层球体粒子的光学特性与内外球体自身的参数以及它们之间的相对位置有关, 由于以外球中心建立坐标系以及球体的对称性, 只需考虑内球中心到外球中心的投影距离而不用考虑内外球体的朝向对粒子光学特性的影响, 以便于问题研究, 简化计算。由异常衍射近似, 双层球体粒子的消光效率可以表示为

$$\begin{aligned} Q_{\text{ext}} &= \frac{2}{P_1} \text{Re} \left\{ \iint_{P_1-P_2} [1 - \exp(-i\phi_1)] dP + \iint_{P_2} [1 - \exp(-i\phi_{12})] dP \right\} = \\ &= \frac{2}{P_1} \text{Re} \left\{ \iint_{P_1} [1 - \exp(-i\phi_1)] dP + \iint_{P_2} [\exp(-i\phi_1) - \exp(-i\phi_{12})] dP \right\} = \\ &= \frac{2}{\pi r_1^2} \text{Re} \left\{ \iint_{P_1} [1 - \exp(-i\phi_1)] dP + \iint_{P_2} [1 - \exp(-i\phi_2)] \exp(-i\phi_1) dP \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

同理, 双层球体粒子的吸收效率可以表示为

$$Q_{\text{abs}} = \frac{1}{\pi r_1^2} \left\{ \iint_{P_1} [1 - \exp(-2\phi'_1)] dP + \iint_{P_2} [1 - \exp(-2\phi'_2)] \exp(-2\phi'_1) dP \right\}, \quad (9)$$

式中光线的传播距离  $l_1 = 2\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2}$ ,  $l_2 = 2\sqrt{r_2^2 - (x-w)^2 - y^2}$ , 相位延时  $\phi_1 = (m_1 - 1)kl_1$ ,  $\phi'_1 = n'_1 kl_1$ ,  $\phi_2 = (m_2 - m_1)kl_2$ ,  $\phi'_2 = (n'_2 - n'_1)kl_2$ ,  $\phi_{12} = (m_1 - 1)k(l_1 - l_2) + (m_2 - 1)kl_2 = \phi_1 + \phi_2$ ,  $\phi'_{12} = n'_1 k(l_1 - l_2) + n'_2 kl_2 = \phi'_1 + \phi'_2$ 。

上述推导过程表明, 双层球体粒子的异常衍射近似可以转化为相应的外球和内球异常衍射近似之和, 表达式的第一项将外球看作均匀球体粒子, 可以由解析式快速计算, 第二项受内外球体的共同作用, 随着内球尺度参数的减小而迅速减小。当  $m_e = m_1 = m_2$  时, 即相位延时  $\phi_2 = 0$ ,  $\phi'_2 = 0$ , 或者当  $r_2 = 0$  时, 垂直于入射光线的内球投影区域  $P_2 = 0$ , 内球投影区域的积分项都为零, 分层均匀双层球体粒子的异常衍射近似退化为均匀球体粒子的异常衍射近似。

仿照上述过程, 利用迭代方法可以将异常衍射近似推广应用于多核或者多层球体模型。

对于双层多核球体模型, 假设外壳的相位延时  $\phi_1 = (m_1 - 1)kl_1$ ,  $\phi'_1 = n'_1 kl_1$ , 各个内核的相位延时为  $\phi_j = (m_j - m_1)kl_j$ ,  $\phi'_j = (n'_j - n'_1)kl_j$ ,  $j \in \mathbb{N} + 1$ , 并且投影区域不相交, 则

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{P_1} \text{Re} \left\{ \iint_{P_1} [1 - \exp(-i\phi_1)] dP + \sum_{j=2}^N \iint_{P_j} [1 - \exp(-i\phi_j)] \exp(-i\phi_1) dP \right\}. \quad (10)$$

类似地, 有

$$Q_{\text{abs}} = \frac{1}{P_1} \left\{ \iint_{P_1} [1 - \exp(-2\phi'_1)] dP + \sum_{j=2}^N \iint_{P_j} [1 - \exp(-2\phi'_j)] \exp(-2\phi'_1) dP \right\}. \quad (11)$$

对于多层球体模型, 假设由外到内各层球体的相位延时  $\phi_j = (m_j - m_{j-1})kl_j$ ,  $\phi'_j = (n'_j - n'_{j-1})kl_j$ ,  $j \in \mathbb{N}$ , 其中  $\phi_1 = (m_1 - 1)kl_1$ ,  $\phi'_1 = n'_1 kl_1$ , 并令  $\phi_0 = \phi'_0 = 0$ , 则

$$\begin{aligned} Q_{\text{ext}} &= \frac{2}{P_1} \text{Re} \left\{ \iint_{P_1} [1 - \exp(-i\phi_1)] dP + \dots + \iint_{P_j} [1 - \exp(-i\phi_j)] \exp(-i\phi_{1,\dots,j-1}) dP \right\} = \\ &= \frac{2}{P_1} \sum_{j=1}^N \text{Re} \left\{ \iint_{P_j} [1 - \exp(-i\phi_j)] \exp(-i \sum_{g=0}^{j-1} \phi_g) dP \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

类似地, 有

$$Q_{\text{abs}} = \frac{1}{P_1} \sum_{j=1}^N \iint_{P_j} [1 - \exp(-2\phi'_j)] \exp(-2 \sum_{g=0}^{j-1} \phi'_g) dP. \quad (13)$$

不同的球体位置分布假设可以得出不同的计算结果。若假设内球中心位置随机变化, 且在外球内满足均匀分布, 即

$$p(x, y, z) = \begin{cases} \frac{3}{4\pi R^3}, & \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq R, \\ 0, & \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} > R. \end{cases} \quad (14)$$

则内球中心偏离外球中心的投影距离  $w$  的概率分布函数和分布密度函数分别为

$$F(w) = P(|x| \leq w, |y| \leq \sqrt{w^2 - x^2}, |z| \leq \sqrt{R^2 - w^2}) = \frac{3}{4\pi R^3} \int_0^w 4\pi \sqrt{R^2 - r^2} r dr = 1 - \frac{\sqrt{R^2 - w^2}}{R}, \quad (15)$$

$$p(w) = \frac{3w}{R^3} \sqrt{R^2 - w^2}, \quad (16)$$

式中  $w \in [0, R]$ ,  $R = r_1 - r_2$ , 均值  $E(w) = \frac{3\pi R}{16}$ 。

对于内球中心位置随机的单个粒子, 相应的平均作用为

$$\bar{Q}_{ad} = \int_0^R Q_{ad} p(w) dw / \int_0^R p(w) dw. \quad (17)$$

分析过程表明, 对于双层球体粒子模型, 假设内球和外球中心正好重合是不周全的。

### 3 仿真结果与对比分析

#### 3.1 均匀粒子的散射特性

以海洋环境中的浮游微生物为例, 入射光波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 海水折射率  $m = 1.33$ , 有机颗粒相对折射率为  $m_c = 1.05 - 0.005i$ , 粒径变化范围  $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ , 计算取  $0 \sim 10 \mu\text{m}$ 。相应粒子的散射特性如图 2 所示。

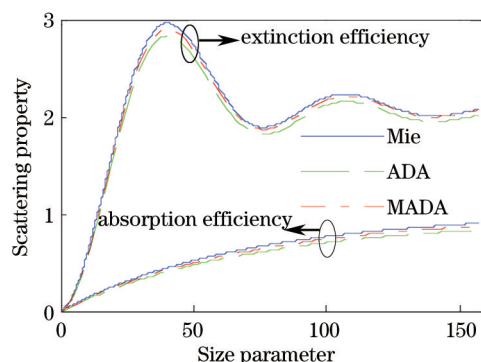


图 2 均匀球体粒子的散射特性

Fig.2 Scattering properties of homogeneous spherical particles

图 2 中蓝色实线是米氏散射的计算值, 绿色虚线是经典异常衍射近似的计算值, 红色点划线是改进异常衍射近似(MADA)<sup>[12]</sup>的计算值。

从图 2 中可以看出, 粒子散射特性主要受尺度因子影响。除去粒子边缘效应产生的偏差量, 经典的异常衍射近似计算的消光效率和吸收效率近似值与精确值基本吻合, 准确反映了局部极值的位置, 随着尺度参数的增大, 极限值趋于 2。而改进的异常衍射近似计算的消光效率和吸收效率近似值与精确值吻合得很好, 偏差量很小。

#### 3.2 多层均匀粒子的散射特性

以 4 层均匀球体粒子为例, 由内而外的半径比例依次为 0.2、0.5、0.8、1, 相对折射率  $m_c$  依次为  $1.3 - 0.005i$ 、 $1.2 - 0.005i$ 、 $1.15 - 0.005i$ 、 $1.05 - 0.005i$ , 其等效的相对折射率为  $m_c = 1.1083 - 0.005i$ , 其他条件同上。相应粒子的散射特性如图 3 所示。

图 3 中蓝色实线是等效的均匀粒子米氏散射的计算值, 绿色虚线是多层粒子 Aden-Kerker 理论的计算值, 红色点划线是本文的扩展异常衍射近似的计算值。

从图 3 中可以看出, Aden-Kerker 理论计算的消光效率精确值随着分层均匀粒子组成结构的变化, 明显有别于其等效的均匀粒子消光效率, 说明此时的均匀球体散射模型不够恰当, 而考虑层次结构因素的扩展异常衍射近似方法计算的分层均匀粒子消光效率近似值仍然与精确值基本保持一致, 但在某些尺度范围甚至超过精确值, 这一点与经典异常衍射近似值始终小于精确值不同。

图 4 显示的是分层均匀的球体粒子从两层变化到 4 层时消光效率精确值与近似值的相对误差, 粒子的

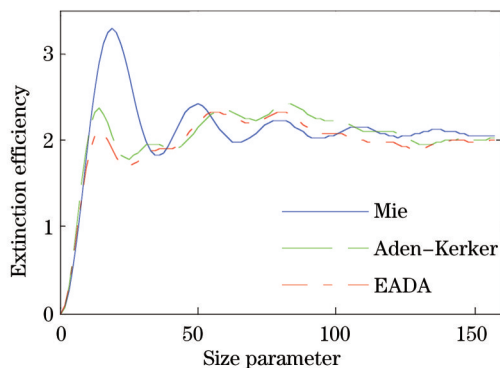


图3 多层均匀球体粒子的消光效率

Fig.3 Extinction efficiency of multilayered homogeneous spherical particles

具体计算参数如表1所示。随着粒子半径的增大,扩展异常衍射近似方法的计算误差时大时小,而随着粒子结构层次的增加,近似误差震荡加剧。但除了最左端的瑞利近似区域,误差大体不超过10%,验证了扩展异常衍射近似方法的可靠性。

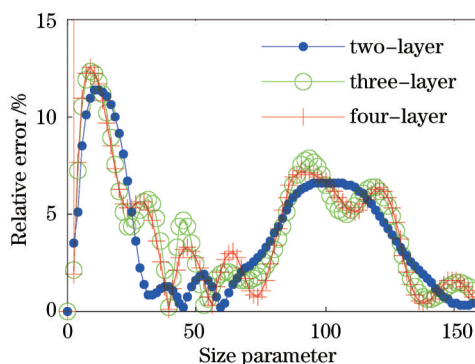


图4 多层均匀球体粒子的消光效率精确值与近似值的相对误差

Fig.4 Relative errors between the exact extinction efficiency and the approximation of multilayered homogeneous spherical particles

表1 多层均匀的球体粒子的计算参数

Table 1 Parameters of multilayered homogeneous spherical particles

Particle	Radius ratio	Relative refractive index
Two-layer	0.8, 1	1.15-0.005i, 1.05-0.005i
Three-layer	0.5, 0.8, 1	1.2-0.005i, 1.15-0.005i, 1.05-0.005i
Four-layer	0.2, 0.5, 0.8, 1	1.3-0.005i, 1.2-0.005i, 1.15-0.005i, 1.05-0.005i

### 3.3 双层球体粒子不同外壳内核参数的散射特性

双层粒子等效的相对折射率  $m_c=1.05-0.005i$  和外壳的相对折射率  $m_s=1.02$  固定不变<sup>[25]</sup>, 双层球体内外半

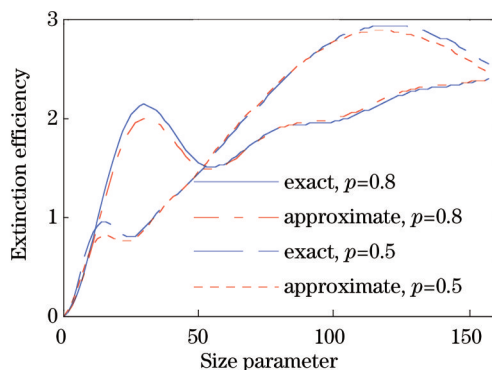


图5 不同参数的双层均匀球体粒子消光效率

Fig.5 Extinction efficiency of the two-layered homogeneous spherical particles with different parameters

径比例分别取 0.5、0.8,其他条件同上。相应粒子的散射特性如图 5 所示。

图 5 中消光效率上升较快的曲线表示粒子内外两层半径比例为 0.8,消光效率上升较慢的曲线表示粒子内外两层半径比例为 0.5。蓝色曲线是 Aden-Kerker 理论的计算值,红色曲线是扩展异常衍射近似的计算值。

从图 5 中可以看出,对于不同参数的双层均匀球体粒子,扩展异常衍射近似计算的消光效率近似值仍然与精确值基本保持一致。在相同等效折射率和外壳折射率的情况下,半径小的内核对散射特性的影响要大于半径大的内核。同样的等效折射率,不同的结构比例,其散射特性完全不同,再次说明均匀球体散射模型不能准确反映粒子的内部特征。

### 3.4 双层球体粒子外壳内核投影中心位置偏离的散射特性

双层粒子等效的相对折射率  $m_c=1.05-0.005i$  和外壳的相对折射率  $m_s=1.02$  固定不变,双层球体内外半径比例取 0.5,内外球心偏离率分别为 0、0.6、1,表示外壳与内核在投影区域共心、偏心和内切,其他条件同上。相应粒子的散射特性如图 6 所示。

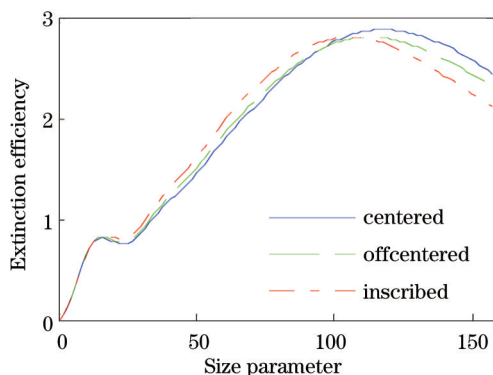


图 6 外壳内核投影中心位置偏离的双层均匀球体粒子消光效率

Fig.6 Extinction efficiency of the two-layered homogeneous spherical particles with a deviation of the shell and core projective center

图 6 中蓝色实线表示内外球心偏离量为 0 的计算值,绿色虚线表示内外球心偏离量为 0.6 的计算值,红色点划线表示内外球心偏离量为 1 的计算值。

从图 6 中可以看出,对于双层均匀球体粒子,相同折射率条件下,外壳内核偏心的消光效率与其外壳内核共心时略有不同,粒子垂直于入射光方向的投影区域里内球中心偏离外球中心越远,内核对前向散射的影响越小,消光效率与内外球体中心重合时的消光效率偏差越大,并逐渐接近于以外壳折射率为等效的均匀粒子的消光效率。平均来看,内核随机分布的平均相位略小,意味着其等效半径或相对折射率小于仅考虑内球中心位于外球中心的情况。当内外球体参数相差较大时,内核空间位置对前向散射的影响不能忽略。

### 3.5 双层球体微藻模型的散射特性

微藻散射正演模型的建立主要基于双层球体粒子假设,设置外层为高吸收的叶绿体,内层为决定细胞体积的细胞质。通过 Stephens 公式估算细胞质的折射率虚部值,循环迭代确定叶绿体在细胞颗粒中所占体积;利用实测的颗粒群吸收光谱反演获得均匀球体模型的折射率虚部,结合 Gladstone-Dale 关系式得到叶绿体的折射率虚部;通过 Kramers-Kronig 关系进而获得细胞质和叶绿体的折射率实部变化量;利用 Aden-Kerker 理论和粒径分布函数,计算出微藻的吸收、散射和衰减效率因子,具体过程详见文献[26]。根据其中的模拟参数,微藻的粒径分布服从正态分布,粒度峰值对应的等效球直径约为  $3.468 \mu\text{m}$ ,叶绿素 a 密度为  $109.4489 \text{ mg/m}^3$ ,叶绿体的体积比例设定为 10%,叶绿体折射率实部中心值确定为 1.07,选用 1.02 作为细胞质折射率实部中心值,则均匀球体模型的折射率实部中心值为 1.025。采用本文的计算方法,相应粒子的散射特性如图 7 所示。

图 7 中蓝色实线是微藻散射效率的测量值,绿色虚线是均匀球体模型的计算值,红色点划线是双层球体模型的计算值。

从图 7 中可以看出,均匀球体和双层球体模型的散射效率相差较大,双层球体模型与实测值之间的误差相对较小,优于均匀球体模型。而本文的近似方法相比文献[26]计算精度略有降低,但波动较为平滑,没有

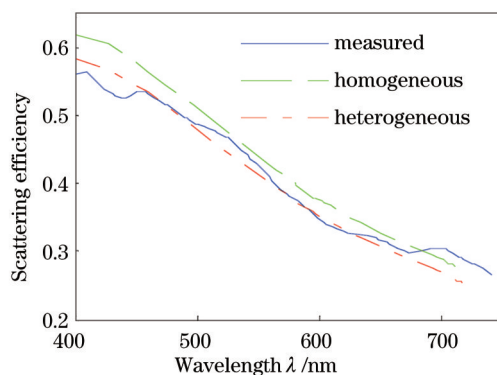


图7 双层球体微藻模型的散射效率

Fig.7 Scattering efficiency of the two-layered spherical algal model

原先微小的起伏振荡。仿真结果验证了双层球体粒子模型和本文方法的效果。

## 4 结 论

在异常衍射近似适用的光学软粒子条件下,尺度较小的非球形体和多层结构粒子对前向散射的影响较小,散射特性可用等效均匀球体近似计算。然而在米氏散射区域,当分层均匀粒子的外层介质折射率与其整体等效折射率相差较大时,其散射特性与等效的均匀粒子散射特性差异明显,粒子的结构组成使得等效方法不再适用。理论分析结果表明,对于分层均匀双层球散射模型,位于投影中心的内核对散射特性的影响要强于偏离投影中心的内核,粒径与折射率大的内核对散射特性的影响要强于粒径与折射率小的内核,折射率大的外壳产生的影响作用要强于折射率大的内核。仿真结果检验了异常衍射近似方法的精确性,说明其在计算不均匀光学软粒子散射特性方面的实用性。

## 参 考 文 献

- 1 Ping Yang, Qian Feng, Gang Hong, *et al.*. Modeling of the scattering and radiative properties of nonspherical dust-like aerosols[J]. *Aerosol Science*, 2007, 38(10): 995-1014.
- 2 Curtis D Mobley, Dariusz Stramski. Effects of microbial particles on oceanic optics: Methodology for radiative transfer modeling and example simulations [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(3): 550-560.
- 3 Su Liping, Ren Deming, Qu Yanchen, *et al.*. Study on the normalized volumetric scattering function for ocean suspended particles [J]. *Laser Journal*, 2006, 27(5): 65-66.  
苏丽萍, 任德明, 曲彦臣, 等. 海水中悬浮粒子归一化体散射函数的研究[J]. *激光杂志*, 2006, 27(5): 65-66.
- 4 Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai. Light absorption and scattering properties of phytoplankton: a theoretical modeling [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(2): 177-180.  
周 雯, 曹文熙, 李 彩. 浮游植物的吸收和散射特性: 理论模型[J]. *光学技术*, 2007, 33(2): 177-180.
- 5 W J Wicombe. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Appl Opt*, 1980, 19(9): 1505-1509.
- 6 M I Mishchenko, G Videen, V A Babenko, *et al.*. T-matrix theory of electromagnetic scattering by particles and its applications: a comprehensive reference database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 88(1-3): 357-406.
- 7 Bruce T Draine, Piotr J Flatau. Discrete-dipole approximation for scattering calculations [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1994, 11(4): 1491-1499.
- 8 E A Hovenac. Calculation of far-field scattering from nonspherical particles using a geometrical optics approach [J]. *Appl Opt*, 1991, 30(33): 4739-4746.
- 9 M Min, J W Hovenier, A de Koter. Scattering and absorption cross sections for randomly oriented spheroids of arbitrary size [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, 79-80: 939-951.
- 10 H C Van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1957.
- 11 Wenbo Sun, Qiang Fu. Anomalous diffraction theory for randomly oriented nonspherical particles: a comparison between original and simplified solutions [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2001, 70(4-6): 737-747.
- 12 Ping Yang, Zhibo Zhang, Bryan A Baumb, *et al.*. A new look at anomalous diffraction theory (ADT): Algorithm in cumulative



- projected-area distribution domain and modified ADT [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 89(1-4): 421-442.
- 13 Sun Xianming, Wang Haihua, Shen Jin. Study on light backscattering by spheroid with inclusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0829001.  
孙贤明,王海华,申晋.含核椭球粒子后向散射特性研究[J].*光学学报*, 2011, 31(8): 0829001.
- 14 Howard R Gordon. Light scattering and absorption by randomly-oriented cylinders: dependence on aspect ratio for refractive indices applicable for marine particles [J]. *Opt Express*, 2011, 19(5): 4673-4691.
- 15 Maciej Matciak. Anomalous diffraction approximation to the light scattering coefficient spectra of marine particles with power-law size distribution [J]. *Opt Express*, 2012, 20(25): 27603-27611.
- 16 Victor G Farafonov, Vladimir B Il'in, Marina S Prokopjeva. Light scattering by multilayered nonspherical particles: a set of methods [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, 79-80: 599-626.
- 17 Dariusz Stramski, Emmanuel Boss, Darek Bogucki, *et al.*. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean [J]. *Progress in Oceanography*, 2004, 61(1): 27-56.
- 18 Arturo Quirantes, Stewart Bernard. Light-scattering methods for modelling algal particles as a collection of coated and/or nonspherical scatterers [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 100(1-3): 315-324.
- 19 Arthur L Aden, Milton Kerker. Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres [J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22(10): 1242-1246.
- 20 Annick Bricaud, Andre Morel. Light attenuation and scattering by phytoplanktonic cells: a theoretical modeling [J]. *Appl Opt*, 1986, 25(4): 571-580.
- 21 Dariusz Stramski, Annick Bricaud, Andre Morel. Modeling the inherent optical properties of the ocean based on the detailed composition of the planktonic community [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(18): 2929-2945.
- 22 Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi. Spectral modeling of marine suspended particulate matter: comparison between ADA and Mie computations [J]. *Spectroscopy and Spectral Analys*, 2010, 30(12): 3367-3370.  
崔廷伟,张杰,马毅.海洋悬浮颗粒的光谱模拟:ADA与Mie的比较研究[J].*光谱学与光谱分析*, 2010, 30(12): 3367-3370.
- 23 Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai, *et al.*. Spectral scattering property of phytoplankton calculated by absorption coefficient and size distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1429-1433.  
周雯,曹文熙,李彩,等.由吸收系数和粒度分布计算浮游植物的散射光谱特征[J].*光学学报*, 2008, 28(8): 1429-1433.
- 24 Tang Hong, Sun Xiaogang, Yuan Guibin. Application on circular cylinder particle size distribution based on anomalous diffraction approximation [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(3): 411-416.  
唐红,孙晓刚,原桂彬.反常衍射近似在测量圆柱形粒子粒径分布中的应用[J].*中国激光*, 2007, 34(3): 411-416.
- 25 Arturo Quirantes, Stewart Bernard. Light scattering by marine algae: two-layer spherical and nonspherical models [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 89(1-4): 311-321.
- 26 Lu Heng, Dai Hongliang, Li Yunmei, *et al.*. Simulating the light absorption and scattering properties of microcystis aeruginosa using a two-layered spherical geometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1229002.  
吕恒,戴红亮,李云梅,等.铜绿微囊藻吸收和散射特性两层球形模型模拟[J].*光学学报*, 2013, 33(12): 1229002.

栏目编辑:史敏