

文章编号: 0253-2239(2010)08-2458-05

基于相函数和消光因子的水雾粒子最佳消光半径研究

杜永成 杨立

(海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 人造水雾可有效衰减红外辐射而广泛应用于目标红外隐身领域,获得最佳消光效果的水雾粒子半径分布区间成为国内外研究的重点和难点。在米氏(Mie)理论的基础上给出了粒子消光的物理和数学模型,总结了确定人造水雾最佳消光半径的三个条件,采用散射相函数和消光效率分析相结合的方法,经过 Matlab 编程计算分析了针对中、远红外波段的水雾粒子最佳消光半径,获得了较为明确的粒径分布区间,给出了中、远红外波段的最佳粒径分布规律。该结论可对舰船及陆路目标的红外隐身及消防灭火研究提供参考。

关键词 光散射;红外隐身;最佳粒径;米氏(Mie)理论;相函数

中图分类号 O436.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2458

Study on Optimal Extinction Radius of Water Fog Particles Based on Phase Function and Extinction Factor

Du Yongcheng Yang Li

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract The infrared radiation could be effectively attenuated by the man-made water fog. For that the water fog particles have been greatly used in the fields of infrared stealth. Some radius distribution of the water fog particles could make the stealth effect be optimal, and that has become the emphasis and difficulty of studies. Based on Mie theory, the physical and mathematic models of the water fog particles extinction were given. Three qualifications used to ascertain optimal extinction radius of the man-made water fog were summed up. In the meantime, aimed at middle and far infrared bands the optimal extinction radius of water fog particles was calculated and analyzed by compiling Matlab programs in the method of scattering phase function and extinction factor. Explicit radius distribution of the water fog particles was got, and the rule of distribution of the optimal particles radius for middle and far infrared bands was given. This conclusion could offer references for studies such as stealth of warships and land targets and fire fighting.

Key words light scattering; infrared stealth; optimal particles radius; Mie theory; phase function

1 引 言

在电磁环境下的现代战场上,红外制导技术的应用越来越广,尤其是对舰导弹在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个大气窗口采用点源制导和成像制导的方法,对现代舰船构成了极大威胁。各种红外隐身措施也得到了各国高度重视与大力研究,其中美国、加拿大、法国和俄罗斯已取得了显著的成果^[1]。水雾粒子因其对红外线的强烈衰减功能而被广泛用于目标的红外隐身。

目前对水雾隐身的研究基本都是建立在米氏(Mie)散射与吸收理论的基础上的。Mie 理论是球形粒子散射吸收模型的精确解,可为水雾隐身的研究提供量化基础。经过近十几年的研究,一些讨论水雾隐身效果与最佳粒径分布的文献多是直接试验测定或单纯依据消光因子的大小。而由于在诸多领域中微粒前、后向散射的重要应用,许多学者也对散射相函数进行了大量研究。国内中国科学院西安光学精密机械研究所、海军工程大学、大连测控技术研

收稿日期: 2009-09-03; 收到修改稿日期: 2009-10-15

基金项目: 国防预研基金(10105020202)资助课题。

作者简介: 杜永成(1985—),男,硕士研究生,主要从事水雾粒子红外隐身方面的研究。E-mail: dycheng@Yeah.net

导师简介: 杨立(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事传热传质热流体学应用及量测等方面的研究。

E-mail: lyang39@hotmail.com

究所和西安电子科技大学等单位^[2]为了测量潜艇尾流气泡散射特性,将光散射的研究主要集中在前向小角度散射和 180° 后向散射方面。但这种方法及所得到的前向散射的各种结论很少用于确定粒径与消光关系的研究。在分析获得最佳消光效果的粒子半径方面,许波等^[3]讨论了粒径分布与粒子消光的关系,文献^[4]将复分散系简化为具有某个平均粒径的均一系模型进行讨论,但这两者都没有针对特定波长提出相应的粒径区间。袁江涛等^[5]针对中远红外的大气窗口波段提出了粒径的分布区间,但仅依据的是粒子的消光效率,并且区间不够明确。在粒子系模型及散射模型的选择上,由于非独立散射模型仍不成熟,多数学者采用单分散系或复分散系独立散射模型,王运华等^[6]进行了两个相邻目标对平面波、高斯波束的光散射建模与解析,刘建斌^[7]在确定的粒子尺度分布的条件下,假设粒子散射是独立散射,粒子之间的距离大于粒子的直径,不计粒子相位的影响,而将它们的散射强度直接相加。综上,采用相函数和消光因子结合分析,确定获得最佳隐身效果的粒子系半径区间有着重要的意义。本文从单

分散系独立散射消光因子和散射光强相函数的计算出发,分析提出了获得最佳隐身效果的水雾粒子半径分布:中红外区粒径应分布在 $1 \sim R_{\chi_{\max}}$ ($R_{\chi_{\max}}$ 表示由消光效率曲线第一个波峰处 χ 值确定的半径值,其中 $\chi = 2\pi R/\lambda$ 表示粒子尺度参数);远红外区粒径应分布在 $R_{\chi_{\max}} \sim R_{\chi_{\min}}$ ($R_{\chi_{\min}}$ 表示由消光效率曲线第一个波谷处 χ 值确定的半径值)。

2 水雾粒子散射模型和相函数

2.1 粒子散射模型

水雾消光隐身的物理模型和数学模型都是建立在麦克斯韦电磁理论的基础上,其物理模型如图 1 所示。

红外线作为一种辐射波,当入射到水雾中时,入射辐射的一部分能量将被水雾粒子截获。水雾粒子内原子、分子被入射辐射的电磁场诱导极化形成偶极子,该偶极子随入射电磁场振荡而做同一频率的受迫振动,构成次声波源,产生次声波。多个震动的偶极子所产生的次声波在微粒周围叠加,随后向其周围空间散布开,散射作用只是使光的空间分布改变了,总能量并没有减少。

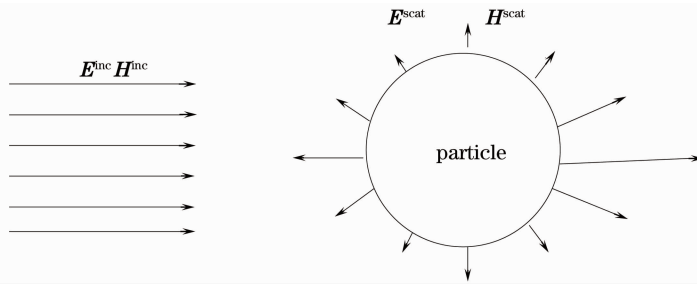


图 1 粒子散射物理模型

Fig. 1 Physical model of the scattering of particle

粒子散射的数学模型^[8]为

$$I_s = \alpha(\theta) I_0, \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光强; I_s 为散射角为 θ , 距离粒子为 l 处的散射光强; $\alpha(\theta)$ 表示的是角散射截面。

2.2 相函数

粒子散射的相函数 $P(\theta, \lambda)$, 可表示为^[9]

$$P(\theta, \lambda) = \frac{4\pi}{\beta_{sc}(\lambda)} \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \int_{r_1}^{r_2} N(r) \frac{i_1(\theta) + i_2(\theta)}{2} dr, \quad (2)$$

式中 i_1, i_2 是散射强度函数, $\beta_{sc}(\lambda)$ 为体散射系数, $N(r)$ 表示粒径 $R = r$ 的粒子数密度。

考虑的是单一粒子的消光特性,所以相函数可以写为

$$P(\theta, \lambda) = \frac{\lambda^2 [i_1(\theta) + i_2(\theta)]}{2\pi^2 r^2 Q_{sc}(\lambda)}. \quad (3)$$

粒子的消光因子 Q_{ex} , 散射因子 Q_{sc} , 吸收因子 Q_{ab} 可由 Mie 理论计算得到^[10]。

3 相函数和消光因子的计算及分析

经过几十年的不懈努力,很多人用不同的方法提出了 Mie 系数的高精度解法^[11,12]。根据朱震^[13]提出的 Mie 理论高精度算法通过 Matlab 编程计算,得到了水雾粒子散射相函数和消光特性的仿真图像。

由文献^[14]知,散射截面将随水雾粒子半径的增大而增大,并且粒子在尺度参数 $\chi < 1$ 的条件下,散射截面与波长 λ 的四次方成反比,与粒子半径的六次方成正比。但是,水雾粒子最佳消光半径并不与消光截面成正相关,而是由至少三个因素来决定:

1) 针对特定波长, 在 $Q_{ex}, Q_{sc}, Q_{ab} \sim \chi$ 曲线的最大极值点处, 由于该点为粒子消光效率的最大值, 故由该点 χ 值确定的粒子半径 $R_{\chi_{max}} = \chi \lambda / 2\pi$ 可作为粒径分布的区间内值。据图 2(a), 3(a), 4(a), 5(a) 得到表 1 的数据。在 $Q_{ex}, Q_{sc}, Q_{ab} \sim \chi$ 的第一个波谷处, 一般为曲线的最小值, 此处确定的 $R_{\chi_{min}}$ 应作为粒径分布的上限值。又由于 Q_{ex} 最终趋于 2.1 左右, 故 $R < R_{\chi_{max}}$ 粒子系的粒径分布下限值应取 Q_{ex} 值为 2.1 处的 R 值。

表 1 消光因子最大值与相应粒子半径

Table 1 Maximum of the extinction factor and the corresponding radius of the particles

$\lambda / \mu\text{m}$	m_r [14, 15]	m_i	$Q_{ex_{max}}$	χ	$R_{\chi_{max}} / \mu\text{m}$
3	1.371	0.272	2.55	5	2.3873
5	1.325	0.0124	3.70	6	4.77
8.2	1.286	0.0351	3.34	7	9.1355
10.6	1.179	0.0718	2.59	11	18.55

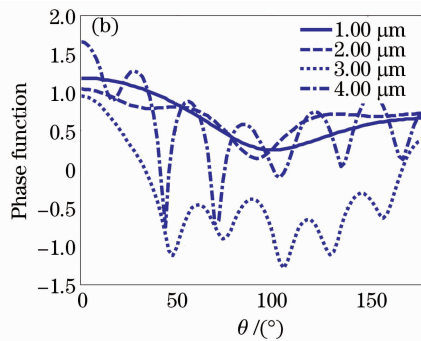
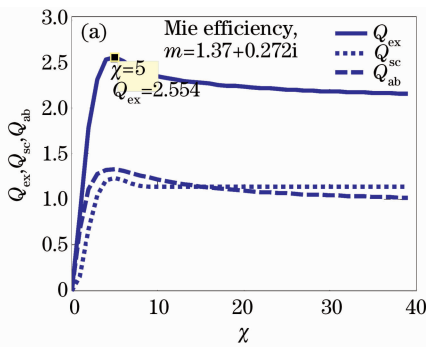


图 2 波长 $3 \mu\text{m}$ 的 (a) 消光因子和 (b) 粒子系相函数

Fig. 2 (a) Extinction factor and (b) phase functions of the particle series for the wavelength of $3 \mu\text{m}$

由图 2(b) 可见, 当粒径为 $1, 2 \mu\text{m}$ 时, 其前向散射和后向散射的光强分布较为平均, 前向散射能量并不集中, 这样利于装备的隐身效果。而当粒径为 $3 \mu\text{m}$ 时, 散射能量明显偏小, 这很可能是因为该粒径处于 $Q_{ex}, Q_{sc}, Q_{ab} \sim \chi$ 曲线的第一个波谷处, 即在图 2(a) 中 $\chi=6.28$ 处, 这也是 $3 \mu\text{m}$ 波长时水雾粒子接近最小的消光效率, 所以该粒径值应该避免。当粒径为 $4 \mu\text{m}$ 时, 相函数的波动非常剧烈, 并且散射峰迅速向前、后移动, 散射光强集中在前向散射的 $0 \sim 10^\circ$, 由于光被散射后并不会改变其波长或频率, 这样集中的前向散射依然会成为红外制导武器或者探测设备的目标, 将很不利于隐身目的的实现, 而当粒径变得更大时前向散射更加明显。因此, 针对 $3 \mu\text{m}$ 波长的红外辐射, 水雾粒子的粒径应该小于 $R_{\chi_{max}}$ 即表 1 中的数据 $2.3873 \mu\text{m}$, 图 3 体现了与图 2 相同的规律。

以上分析了中红外波段 $3 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 两个特定

2) 根据粒子散射的相函数, 应该选择散射光强空间分布较为平均, $P(0, \lambda) \sim P(10, \lambda)$ 相对较小, 而 $P(10, \lambda) \sim P(180, \lambda)$ 相对较大的粒子分布。因为被散射的能量只是空间分布变化了, 其频率波长并不会改变, 前向散射的能量依然会成为红外制导武器或探测设备的目标源。粒子过大将使散射光强集中在前向散射角, 不利于隐身。

3) 粒子的散射截面与粒子半径是正相关的, 但粒子半径过大必然使水雾粒子数密度变小, 使整体隐身效果不佳。在满足消光效率的情况下应尽可能的采用细密水雾。由于喷雾控制方面的技术限制, 本文只对前两方面做仿真分析。

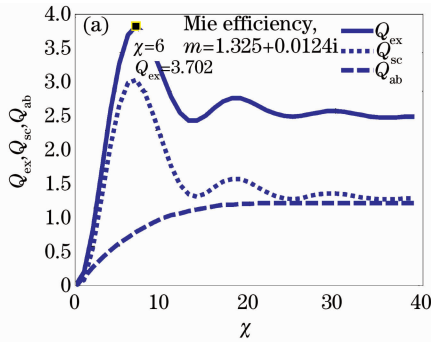
如图 2(a) 所示, 波长为 $3 \mu\text{m}$ 时, 最大消光因子为 2.554, 其所对应的 χ 值为 5, 那么极值点处的粒子半径为: $R_{\chi_{max}} = 2.3873$, 在该值附近 $1, 2, 3$ 和 $4 \mu\text{m}$ 粒径的粒子系散射相函数如图 2(b)。

波长, 经过对该波段内其他特定波长的计算, 发现对中红外区的特定波长, 粒子系应分布在半径小于 $R_{\chi_{max}}$ 的区间内, 该区间的下限值应是 $Q_{ex} = 2.1$ 所确定的 R 值。波长 $3 \mu\text{m}$ 时该区间 R 为 $1.24 \sim 2.39 \mu\text{m}$, 波长 $5 \mu\text{m}$ 时 R 为 $2.63 \sim 4.77 \mu\text{m}$ 。在针对中红外波段大气窗口即 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长的水雾隐身时水雾粒子半径 R 的分布区间应该在 $1.2 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 。

$8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的大气窗口处于远红外区, 分析了 $8.2 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 波长。由图 4, 5 发现, 在远红外区粒子散射的相函数规律与中红外区出现了相反的情况, $R > R_{\chi_{max}}$ 粒子系的 $0 \sim 20^\circ$ 散射角的 $P(\theta, 8.2)$ 和 $P(\theta, 10.6)$ 明显小于 $R < R_{\chi_{max}}$ 粒子系的相函数值, 而 $160^\circ \sim 180^\circ$ 散射角, 则是 $R > R_{\chi_{max}}$ 粒子系的相函数值明显大于 $R < R_{\chi_{min}}$ 粒子系的相函数值。 $20^\circ \sim 160^\circ$ 散射角范围内, 各个粒径的相函数值相差不大。 $R < R_{\chi_{max}}$ 的粒子系由于相对集中的前向散射将不利于隐身。而 $R > R_{\chi_{max}}$ 的粒子系前向

散射相对小,后向散射相对大,这样的光强空间分布更利于装备的红外隐身.因此,在远红外区获得最佳隐身效果的水雾粒子半径应分布在 $R_{\chi_{\max}}$ 至第一个波谷处 χ 所确定的半径值,即 $R_{\chi_{\max}} \sim R_{\chi_{\min}}$ 之间。

最终得到对于 $8.2 \mu\text{m}$ 波长粒径取值区间应为



$9.14 \sim 17.23 \mu\text{m}$;对于 $10.6 \mu\text{m}$ 波长时最佳粒径区间为 $18.55 \sim 33.7 \mu\text{m}$ 。其中 $10.6 \mu\text{m}$ 波长是新一代激光测距机的首选波段,并在激光制导,干扰等军事应用中发挥着至关重要的作用。本文的结论对这些应用及反制手段有着参考意义。

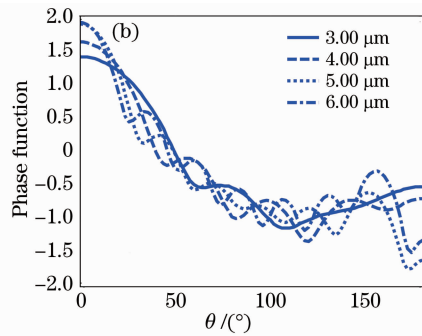


图3 波长 $5 \mu\text{m}$ 的(a)消光因子和(b)粒子系相函数

Fig. 3 (a) Extinction factor and (b) phase functions of the particle series for the wavelength of $5 \mu\text{m}$

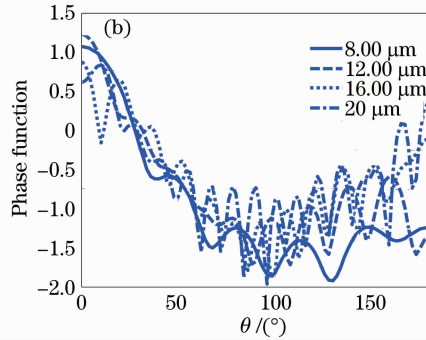
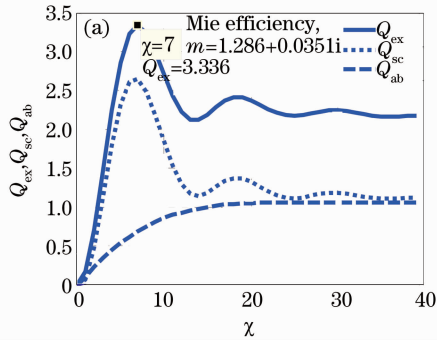


图4 波长 $8.2 \mu\text{m}$ 的(a)消光因子和(b)粒子系相函数

Fig. 4 (a) Extinction factor and (b) phase functions of the particle series for the wavelength of $8.2 \mu\text{m}$

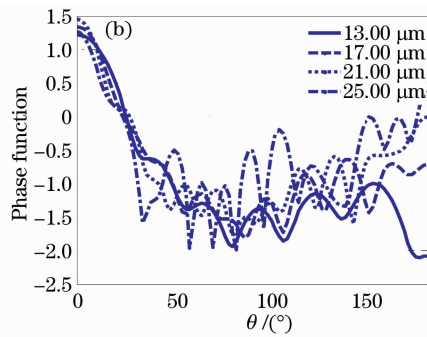
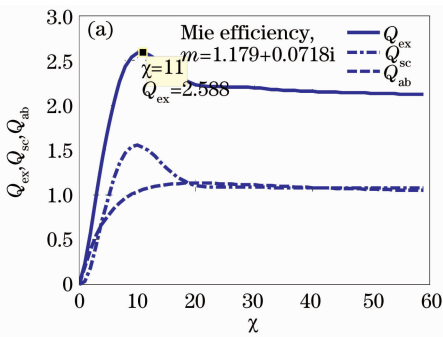


图5 波长 $10.6 \mu\text{m}$ 的(a)消光因子和(b)粒子系相函数

Fig. 5 (a) Extinction factor and (b) phase functions of the particle series for the wavelength of $10.6 \mu\text{m}$

4 结 论

通过对消光因子和相函数的计算及比较分析可得出以下主要结论:

1) 获取最佳隐身效果的水雾粒子半径的决定因素很多,其中消光效率和相函数是很重要的两个因素。消光效率越大越好,相函数的前向散射越小越

好。而作为喷雾技术,雾化的粒子数密度越大越好。

2) 在中红外区特定波长下,水雾粒子半径应分布在比最大消光效率所对应的粒子半径 $R_{\chi_{\max}}$ 小的一侧,上限值为 $R_{\chi_{\max}}$,下限值为 $Q_{\text{ex}} = 2.1$ 所确定的 R 值;在远红外区,则应分布在比 $R_{\chi_{\max}}$ 大的一侧,下限值为 $R_{\chi_{\max}}$,上限值则为 $R_{\chi_{\min}}$ 。

3) 红外目标的水雾隐身所涉及的运算是极其复杂的, 本文的研究对象设为独立散射的单分散粒子系。实际隐身系统或其他粒子遮蔽系统将涉及到复杂的复分散系, 粒子之间有多重相互影响, 目前尚无精确的计算方法, 此外, 在控制喷射水雾粒子半径方面尚不够理想, 按照对数正态分布建模时, 其平均粒径往往较大, 且粒径偏差较大, 这些问题尚待进一步研究。

参 考 文 献

- Jin Liangan, Wang Xiaotong, Fu Jianguo *et al.*. Study on special foam screen and its multi-band interfering performance[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, **27**(2): 248~251
金良安, 王孝通, 付建国 等. 泡沫型干扰幕及其多波段干扰特性研究[J]. *兵工学报*, 2006, **27**(2): 248~251
- Zhao Weijiang, Su Liping, Ren Deming *et al.*. Measurement on the angular scattering properties of wake bubbles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 744~747
赵卫疆, 苏丽萍, 任德明 等. 尾流气泡激光散射的测量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 744~747
- Xu Bo, Shi Jiaming, Wang Jiachun *et al.*. Calculation and analyzing of the extinction characteristics of the water fog[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(1): 38~41
许波, 时家明, 汪家春 等. 水雾遮蔽性能的计算与分析[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(1): 38~41
- Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua. Numerical Calculation on Infrared Radiative Properties and Transfer—Calculating Thermal Radiation[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006, 119
谈和平, 夏新林, 刘林华. 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, 119
- Yuan Jiangtao, Yang Li, Xie Jun *et al.*. Study on extinction properties of water fog particles in multi-spectrum based on Mie theory[J]. *Optical Technique*, 2007, **32**(3): 459~461
袁江涛, 杨立, 谢骏 等. 基于 Mie 理论的水雾粒子多光谱消光特性研究[J]. *光学技术*, 2007, **32**(3): 459~461
- Wang Yunhua, Guo Lixin, Wu Zhensen. Light scattering of plane wave/Gaussian beam from two adjacent objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1711~1718
王运华, 郭立新, 吴振森. 两个相邻目标对平面波、高斯波束的光散射[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1711~1718
- Liu Jianbin, Wu Jian. Light scattering model and angular spectrum of scattering intensity in fogs[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3): 355~358
刘建斌, 吴健. 群体雾粒子散射模型及散射角谱研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(3): 355~358
- Li Wei, Yang Kecheng, Xia Min *et al.*. Distribution characteristics of scattered light intensity on coated air bubble in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 799~803
李薇, 杨克成, 夏珉 等. 光在水中吸附膜层气泡上的散射特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 799~803
- Wang Mian, Liu Wenqing, Lu Yihuai *et al.*. Study on the measurement of the atmospheric extinction of fog and rain by forward-scattering near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(8): 1776~1780
王緬, 刘文清, 陆亦怀 等. 基于前向近红外散射光谱测量雾和雨天大气消光的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(8): 1776~1780
- Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Theoretical analysis and numerical calculation of transmitted light intensity of light scattering from nano-particle random scatterers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 951~956
叶云霞, 范滇元. 光通过纳米颗粒随机散射体透射光强的计算及分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 951~956
- W. J. Lentz. Generating Bessel functions in Mie scattering calculations using continued fractions[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(3): 668~671
- W. J. Wiscombe. Improved Mie scattering algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9): 1505~1509
- Zhu Zhen, Ye Mao, Lu Yong. High precise algorithm of Mie scattering in the particle sizing by light scattering[J]. *J. Opt. Electronics · Laser*, 1999, **10**(2): 135~138
朱震, 叶茂, 陆勇. 光散射粒度测量中 Mie 理论的高精度算法[J]. *光电子·激光*, 1999, **10**(2): 135~138
- Yin Hong. Atmospheric Radiation Foundation[M]. Beijing: Meteorological Press, 1993, 68
尹宏. 大气辐射学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1993, 68
- G. M. Hale, M. R. Querry. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(3): 556~562