

文章编号: 0258-7025(2009)01-0216-03

云粒子探测器研究

卜令兵 单坤玲 黄兴友

(南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044)

摘要 介绍了米氏(Mie)散射理论,设计了基于米氏散射理论的云粒子探测器。该探测器使用 685nm 的二极管激光器照亮敏感区域的云滴粒子。光学接收部分分为前向散射和后向散射两部分,前向散射接收云粒子立体角在 $4^\circ \sim 12^\circ$ 的散射而后向散射接收 $126^\circ \sim 134^\circ$ 之间的能量。根据前向散射信号的强度可以确定云滴粒子尺寸,云粒子尺寸确定后,可以利用前向散射和后向散射的比值推断被测云粒子的相态。利用米氏散射理论计算了云粒子散射能量强度随粒子尺寸的变化和前、后向散射能量比随云粒子折射率的变化。

关键词 散射; 云粒子; 米氏理论; 散射能量; 散射比

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093601.0216

Studies on Probe of Cloud Droplet

Bu Lingbing Shan Kunling Huang Xingyou

(School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract Mie theory and design of a probe of cloud droplet based on this theory are introduced in this paper. A 685 nm diode laser is used to illuminate the cloud droplets in the sensitive area in the probe. The forward-scattering part and backward-scattering part are included in the optical receiving system. The former collects energy between the solid angle of $4^\circ \sim 12^\circ$, and the latter collects energy between $126^\circ \sim 134^\circ$. The size of the cloud droplet can be obtained by the data from the energy of the forward-scattering. When the size of the cloud droplet is known, the phase state of the cloud droplet can be inferred from the ratio of forward-scattering to backward-scattering. In the end, the intensities of forward-scattering varied with sizes of cloud droplets and the ratios of forward-scattering to back-scattering varied with the refractive indexes are presented by using the Mie theory.

Key words scattering; cloud droplet; Mie theory; scattering energy; scattering ratio

1 引言

为使云中水分更多地转化为降水,达到增雨的目的,人工增雨时需要于适当时机在云体的适当部位进行催化作业^[1]。但是,由于云体的复杂多变等因素,单凭地面上的一些观测手段所得到的信息很难确定云中的可播区。这对催化决策的准确性造成很大影响,因此如何准确地了解云系的结构是人工影响天气科学问题的焦点。利用飞机直接飞入云系内部,进行有效的观测,是近代云物理学一直采用的研究方法。上世纪 70 年代以来,美国研制了一套自动化的机载云粒子测量系统(PMS),目前该套仪器在自动化测量和探测精度的方面均有了很大的提高^[2]。我国相关仪器研究较少,所用的云粒子探测系统都是从国外进口的。

本文设计了基于米氏(Mie)散射理论的云粒子探测器,该探测器能够获取直径在 $4 \sim 50 \mu\text{m}$ 以内的云粒子尺寸和相态信息,并计算了云粒子散射能量强度随粒子尺寸的变化和前、后向散射能量比随云粒子折射率的变化。本研究对云粒子探测器的研制有一定的意义。

2 理论

在平面偏振光入射的情况下,散射光强为^[3]:

$$I = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} (i_1 \sin^2 \Phi + i_2 \cos^2 \Phi) I_0, \quad (1)$$

其中 Φ 为入射光的电矢量相对于散射面的夹角。

$$i_1(\theta) = S_1(m, \theta, x) \cdot S_1^*(m, \theta, x), \quad (2a)$$

$$i_2(\theta) = S_2(m, \theta, x) \cdot S_2^*(m, \theta, x), \quad (2b)$$

基金项目: 校科研基金(20080122)资助课题。

作者简介: 卜令兵(1976—),男,博士,讲师,主要从事激光大气遥感方面的研究。E-mail: lingbingpu@gmail.com

$i_1(\theta), i_2(\theta)$ 为散射光的强度函数, S_1^*, S_2^* 分别是 S_1, S_2 的共轭复数, x 为颗粒的尺寸参数 ($x = \pi d/\lambda$); $m = m_1 - im_2$ 为粒子相对于周围介质的折射率, 虚部不为零时表示粒子有吸收, S_1, S_2 是散射光的振幅函数

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n), \quad (3a)$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n), \quad (3b)$$

式中 n 为小球的分波序数。将(3a)式、(3b)式分别代入(2a)式、(2b)式可以得到 $i_1(\theta), i_2(\theta)$ 具体的表达式

$$i_1(\theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2, \quad (4a)$$

$$i_2(\theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \right|^2, \quad (4b)$$

a_n, b_n 为复宗量的 Riccati-Besselshi 函数式的复合式, 称为米氏系数, 为便于计算机编程计算, 常写成如下形式

$$a_n = \frac{[D_n(mx)/m + n/x] \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x)}{[D_n(mx)/m + n/x] \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)}, \quad (5)$$

$$b_n = \frac{[mD_n(mx) + n/x] \Psi_n(x) - \Psi_{n-1}(x)}{[mD_n(mx) + n/x] \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)},$$

式中 $D_n(\rho) = \frac{d}{d\rho} \ln \psi_n(\rho)$ 。由上述各式可知, 粒子散射能量一般是多个变量的函数。但对于特定的米氏散射接收系统, 除粒子尺寸外其他参数均确定。因此米氏散射的能量强度是粒子直径的单值函数, 根据粒子散射能量的大小可以反推粒子直径^[4]。

3 系统结构

系统光路如图 1 所示, 采用单横模 685 nm 二极管激光器作为发射光源^[5,6]。云粒子在受激光照射后发生散射, 遵循米氏散射原理。接收一定立体角内的粒子前向散射, 根据前向散射能量的大小确定粒子尺寸(随着粒子尺寸的增加散射能量增加)。对于一定尺寸的云粒子, 当接收角确定后, 前向散射和后向散射的比值和待测粒子的折射率有关, 根据两者比值则可以推断该处云区的云粒子为冰水混合物。

系统探测敏感区域由质量控制通道处的光阑确定, 光信号能量在棱镜处的分光比为 3:1, 其中质量控制通道为 3。当粒子距离光路示意图中焦点较远时, 根据几何成像的原理, 成像的位置发生变化(前后发生变化), 而使部分光被光阑挡住, 出现质量控制通道能量小于探测通道的情况。距离焦点越远则

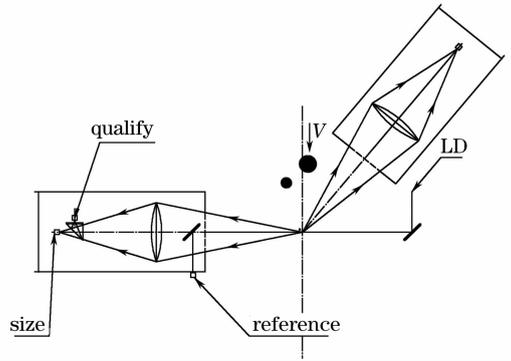


图 1 系统光路图

Fig. 1 Diagram of the system

质量控制通道探测得到的能量越少, 而探测通道能量基本不发生变化。根据两者之间的关系, 可以舍弃距离焦点较远的粒子。探测通道和质量控制通道出来的电信号首先被放大, 通过比较器进行质量控制。同时使用多通道信号分析仪对探测通道的信号进行分析。比较器输出为 0~5 V 的数字信号送给数字信号处理器(DSP), 作为接收和拒收的判断依据, 如果是高电平则将分析仪输出的信号通过 RS232 串口送给计算机, 若为低电平, 则系统不记录该粒子。质量控制通道处光阑的大小确定敏感区域的大小, 本仪器设计为 2 mm, 与光斑宽度相乘即为粒子探测敏感区域的截面积, 再与粒子进入敏感区域的速度关联即得到体积, 进而可以计算粒子密度。

4 数值分析

利用米氏散射理论计算 20 μm 的水粒子的散射能量随角度的变化如图 2 所示, 极坐标图中矢径长度为取自然对数以后的散射能量幅度。由图 2 可以看出, 20 μm 时前向散射能量的最大值比后向散射能量高约 4 个数量级。在设计时, 为避免前后向

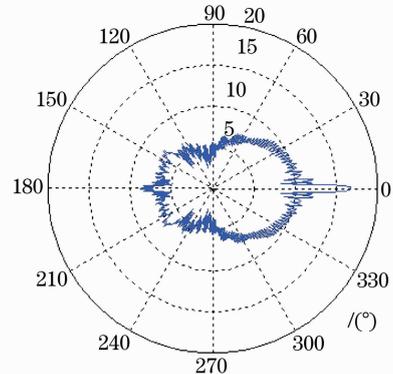


图 2 20 μm 水滴散射能量分布图

Fig. 2 Scattering energy distribution of 20 μm water droplet

散射能量散射比动态范围较大,必须摒弃 0° 附近的前向散射。粒子后向散射在幅度上仅次于前向散射,高于粒子散射在 130° 附近的能量。但经过计算发现,粒子散射在 180° 附近一定立体角内接收的能量起伏较大,不利于计算前后向散射的比值,因此,后向散射取 $128^\circ \sim 134^\circ$ 之间能量。

系统中能够直接测量的是一定立体角范围内的散射激光能量的大小,因此,必须建立粒子尺寸与散射能量间的关系。散射能量到信号强度之间的转化过程中有诸如有效照射能量、探测器量子效率等未知量,能量尺寸关系中可以使用的相对能量。能量尺寸关系可以由实验测量,实验中采用已知尺寸的小球模拟云粒子,将不同尺寸的小球送入敏感区域,再根据已知小球的折射率,转化为云粒子的尺寸即可以建立能量尺寸图^[7]。由于尺寸和加工精度等原因,微米量级已知尺寸的小球造价十分昂贵,因此,能量尺寸图也可以由米氏散射理论给出,如图 3、图 4 所示。

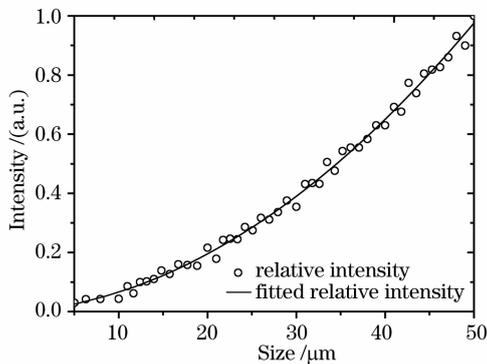


图 3 不同尺寸散射能量的相对强度

Fig. 3 Relative intensities of different sizes

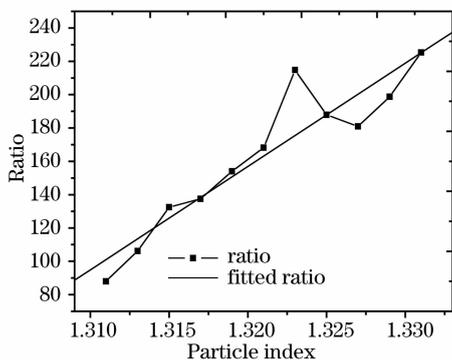


图 4 不同折射率时前后向散射的能量比值

Fig. 4 Foreward-scattering/backward-scattering ratios of different indexes

由于米氏散射理论本身的原因(非严格的线性关系),可以将整个可测量区域分成若干个粒径通

道,每一个粒径通道对应一个阈值电压,当实测电压超过阈值电压时就可以得到该粒子的尺寸。一般情况下,冰的折射率为 1.309,水的折射率为 1.333,冰水混合物的折射率可以由一定的数学模型计算得到,必然处于水和冰的折射率之间。仍把冰水混合物看作是一球形粒子,则可以根据米氏散射理论可以计算相同尺寸下,不同折射率之间的前后向散射能量的比值,根据该能量比值可以推断云粒子的相态^[8]。

5 结 论

介绍了米氏散射理论,设计了用于 $4 \sim 50 \mu\text{m}$ 大小云粒子测量的探测器,该探测器同时使用前向散射和后向散射。根据前向散射信号的强度可以确定云滴粒子尺寸;利用前向散射和后向散射的比值可以推断被测云粒子的相态。计算了云粒子散射能量和粒子尺寸的关系以及前、后向散射能量比和粒子折射率的关系,本研究对云粒子探测器的研制具有一定意义。

参 考 文 献

- 1 Tao Shuwang, Liu Weiguo, Li Niantong *et al.*. A study of real-time identification of seedability of cold stratiform clouds[J]. *Quarterly J. Applied Meteorology*, 2001, **12**(s1): 14~22
- 2 陶树旺,刘卫国,李念童等. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究[J]. *应用气象学报*, 2001, **12**(增刊): 14~22
- 3 D. Nagel, U. Maixner, W. Strapp *et al.*. Advancements in techniques for calibration and characterization of in situ optical particle measuring probes and applications to the FSSP-100 probe[J]. *J. Atmosphere and Oceanic Technology*, 2007, **24**: 745~760
- 4 C. F. Bohren, D. R. Hufm. Absorption and Scattering of Light by Small particles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983. 83~129
- 5 Li Xuebin, Xu Qingshan, Hu Huanling. New method to deduce imaginary part of refractive index of aerosol with double-scattering angles laser optical particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 391~394
- 6 李学彬,徐青山,胡欢陵. 双散射角光学粒子计数器测量气溶胶折射率的新方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 391~394
- 7 Fang Gu, Juan Yang, Baomin Bian *et al.*. A model for aerosol mass concentration using an optical particle counter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 214~217
- 8 Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin *et al.*. Aerosol mass density algorithm based on average mass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1706~1710
- 9 顾芳,杨娟,卞保民等. 基于平均质量的悬浮颗粒物的质量密度算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1706~1710
- 10 J. E. Dye, D. Baumgardner. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. Part I: electronics and optical studies[J]. *J. Atmosphere and Oceanic Technology*, 1984, **1**: 429~344
- 11 R. P. Lawson, B. Pilon, B. Baker *et al.*. Aircraft measurements of microphysical properties of subvisible cirrus in the tropical tropopause layer[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2008, **8**: 1609~1620