

文章编号:1003-6199(2013)03-0128-04

卷云冰晶粒子散射特性的理论计算 与实验测量研究进展

王金虎^{1,2}, 葛俊祥¹, 魏 鸣², 顾松山²

(1. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044;

2. 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044)

摘 要:总结卷云冰晶粒子常用的物理参数如形状尺寸以及谱分布, 论述卷云冰晶粒子散射特性的常用计算算法, 重点介绍毫米波波段冰晶粒子散射特性的计算方法如 DDA、T 矩阵、FDTD 方法并研究各种方法的优缺点。总结国内外气象粒子的实验测量方法如微波后向散射测量装置、FP 腔、双站 RCS 快速测量技术、微波暗室测量方法, 最后对该领域内研究动向进行概述。

关键词:卷云; 冰晶粒子; 物理参数; 理论计算; 实验测量

中图分类号: TN011

文献标识码: A

Research Progresses on Theoretical Computation and Experimental Measurement of Scattering Properties of Ice Particles

WANG Jin-hu^{1,2}, GE Jun-xiang¹, WEI Ming², GU Song-shan²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nuist, Nanjing, Nanjing 210044, China;

2. Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, CMA, Nuist, Nanjing, Nanjing 210044, China)

Abstract: The most common physical parameters of cirrus such as shape and size distribution were summarized, discussing the common algorithms which can be used to compute scattering properties of ice particles, advantages and disadvantages of the algorithms such as DDA, T-matrix, FDTD were been studied. The microwave experimental device of measuring backscattering property, FP resonator, the measuring technique of bi-static RCS, the measuring technique of microwave anechoic room were been researched. At last, the present research trend of this field about scattering properties of ice particles was summarized.

Key words: cirrus; ice particles; physical parameters; theoretical computation; experimental measurement

1 引 言

卷云平均覆盖了地球上空 20%—30%, 其水平范围从几公里到上千公里, 由于卷云既反射太阳的短波辐射又吸收地面的长波辐射, 对地球—大气系统的辐射收支有着重要的影响^[1], 因此对卷云的辐射特性进行研究, 建立各种非球形冰晶粒子的散射特性数据库具有十分重要的意义^[2]。

目前对云的探测手段主要有卫星遥感、天气雷达、激光雷达、云幕测量仪以及高空气球等。卫星

遥感探测间隔时间长, 空间分辨率低; 天气雷达对浅薄云不敏感; 激光测云雷达、云幕测量仪以及气球只能探测空间某一点的云信息。因此, 常规的探测云手段虽然可以获取云信息, 但是时间分辨率和空间分辨率都较低, 不能探测云内部结构, 难以准确反映时刻变化的云参数信息^[3]。作为新型的云探测工具, 毫米波测云雷达具有很高的灵敏度和分辨率, 可以探测云的内部结构, 弥补了常规云探测的不足。

为了利用毫米波测云雷达的回波特性评估冰云, 必须对毫米波波段云中冰粒子的散射特性进行

收稿日期: 2013-06-20

基金项目: 2011 年国家科技部公益性(气象)行业专项毫米波云雷达关键技术研究项目(GYHY201206038); 江苏省 2012 年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX12_0500)

作者简介: 王金虎(1987—), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 研究方向: 电磁散射、雷达系统(E-mail: goldtigerwang@nuist.edu.cn); 葛俊祥(1960—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 雷达系统、微波毫米波与天线技术、电磁散射与绕射理论。

理论和实验研究^[4]。目前理论研究卷云中冰晶粒子散射的方法多集中在 FDTD^[5]、DDA^[6]、T 矩阵^[7]等,常用的实验方法主要有微波后向散射测试方法、FP 腔法、双站 RCS 快速测量方法、微波暗室测量。本文结合国内外相关资料对冰晶粒子散射理论计算方法以及实验方案进行综述,以此为研究毫米波段卷云冰晶粒子的散射特性提供部分的参考依据。

2 卷云冰晶粒子的物理参数

冰云主要由比球形粒子复杂的各种形状的冰晶粒子组成,卷云、高积云、高层云上部及雨层云上部等一般由冰晶组成,所以属于冰云。冰晶粒子的散射特性与其形状、大小、组成成分、取向以及入射波长等因素有关,毫米波散射特性的研究目的,就是分析冰云的特性和云粒子的后向散射特性的关系,从而利用毫米波雷达的回波来准确反演云的特性。

2.1 卷云单个冰晶粒子的尺寸以及形状

冰晶粒子的形状和大小是多种多样的,随高度变化,它取决于温度、相对湿度以及在云中是否经历了碰撞与合并过程^[8],中纬度卷云冰晶粒子的典型尺度变化范围为 10~4000um^[9],Hong gang 在研究 94GHz 频率下非球形冰晶粒子的散射特性时将冰晶云的粒子分成了 6 种形状,包括六角棱柱、中空六棱柱、六角平板、子弹花环、聚合物以及过冷水滴,粒子的尺度范围为 2~5500um^[10]。Ping Yang 等在计算冰晶粒子单次散射特性时将冰晶粒子分成了聚合物、实心以及空心六棱柱、椭球形、六角平板状、过冷水滴以及子弹花环,计算中粒子的尺度范围为 2~10000um^[2]。

2.2 卷云冰晶粒子的谱分布

云物理中把云中冰晶浓度(单位体积中冰晶的个数)随尺度的变化叫做冰晶谱,冰晶谱 $N(D)$ 代表了冰晶的大小 D 与数量 N 的对应关系,它是一种反映云特征的微物理参量。冰晶谱分布主要有对数正态分布、伽玛分布、双峰伽玛分布、幂指数分布等^[11],目前云粒子计算中最常用的是伽玛粒子谱分布^[12],形式如下所示:

$$n(D) = N_0 D^\mu e^{-\kappa D} \quad (1)$$

其中 N_0 为截距, μ 为离散度, κ 为斜率

由于 $\kappa = \frac{b+\mu+0.67}{D_m}$,故(1)式可改写成:

$$n(D) = N_0 D^\mu e^{-\frac{b+\mu+0.67}{D_m} D} \quad (2)$$

其中 D_m 为粒子谱分布的平均最大尺寸,其值一般小于 1.0mm,离散度 μ 的取值范围为 0~2, b 的取值按照下面的定义:

$$\begin{cases} b=2.1 & \text{热带的冰云} \\ b=2.3 & \text{中纬度的冰云} \end{cases}$$

3 冰晶粒子的散射理论计算与实验标定

3.1 卷云冰晶粒子散射的计算方法

卷云冰晶粒子散射计算的方法有时域法(FDTD)、离散偶极子近似法(DDA)、T 矩阵(T-Matrix)、有限元法(FEM)、矩量法(Mom)、几何光学法(GOM)、异常衍射理论(ADT)等。在毫米波段下,计算卷云冰晶粒子最常用的是 FDTD、DDA 以及 T 矩阵方法,故对这三种方法做简单的介绍:

3.1.1 时域有限差分(FDTD)法

自 1966 年 Yee 首次提出时域有限差分方法以来,该方法已经得到了迅速地发展以及应用。目前公开的 FDTD 软件主要有 FDTDA、XFDTD、EMA3D、AutoMesh、A Conformal FDTD Software Package 等^[13],FDTD 方法可以应用于各种形状的粒子,但是当尺度参数 χ ($\chi = 2\pi r/\lambda$, r 为粒子的等效半径, λ 为入射电磁波的波长)大于 20 时,计算所需的 CPU 的时间和内存空间变得有点不切实际^[2]。

3.1.2 离散偶极子近似 DDA 方法

DDA 方法最早是由 Purcell 和 Pennypacker 于 1973 年首次提出,后经过 Draine 等人的进一步改进,现在已经发展成一种成熟的算法,其最大的优点是可以计算任意形状、非均匀和各向异性粒子的散射问题。DDA 的基本思想是用有限个离散的、相互作用的小偶极子的阵列来近似实际的粒子,这些小偶极子必须在形状上和电磁特性上足够描述它们所模拟的粒子,即两者具有相同的离散关系从而对实际粒子的研究转化为对这些小偶极子的研究。任给一粒子,设其可离散为 N 个小立方体,每个小立方体的散射特性可用一个偶极子表示。整个粒子成为含有 N 个偶极子的阵列。 N 越大计算结果越精确,但对计算要求越高。用这种方法时离散偶极子的数目随散射体的尺度参数以指数形式增加,从而进行随机取向的运算量也将快速增大。

3.1.3 T-matrix

该方法最早是由 P. C. Waterman 提出的,原用来求解导体的散射问题,后来推广应用到求解介质

体,该方法多用于计算轴对称粒子的散射问题,因为散射体具有轴向对称(或在空间随机取向)时,可以用互易性定理,即入射光和散射光是可以互易的,这时T矩阵化为由6个独立元素组成的对角矩阵,且每个子矩阵都可独立计算。T矩阵中的每一个矩阵依赖于散射体的形状、大小和折射指数,而与入射场和散射场没有关系,因此只要计算一次T矩阵就可用于任意距离处光散射的计算。T矩阵方法的优点是程序中有自动收敛检测使计算结果比较准确,速度也很快,但目前的代码只能用于计算轴对称物体(如椭球体、圆柱体等)的散射。对尺度参数较大的粒子,计算结果不收敛,对于取向比远偏离1的粒子,T矩阵也只能计算小尺度参数粒子的散射^{[14][11]}。

总之,各种计算方法有各自的优缺点和适用范围,而目前还没有一种方法可以精确快速地求解任意形状、任意尺寸的非球形粒子散射特性。实际应用中,我们只能根据粒子的实际特征来选取合适该类粒子的计算方法。其中,FDTD、DDA适用于任意形状及非均匀的粒子,但是由于计算机内存和速度的限制,当尺度参数大于20的时候就不可以使用FDTD和DDA算法进行计算了,T矩阵精度远胜过FDTD和DDA方法,但是这种方法仅适用于计算轴对称的粒子,比如球、椭球、圆柱以及切比雪夫粒子。GOM、ADT适用于尺寸比入射波长大的粒子,但精度较低,而且这两种方法在仿真不均匀粒子或者复杂的粒子模型时存在着一定的难度^[15]。

目前一些常用的商业软件也可对粒子的后向散射进行仿真计算,如HFSS(基于有限元)、CST软件(基于时域有限差分)、FEKO(基于矩量法)。

3.2 卷云冰晶粒子散射的实验测量技术

国内外对气象目标物如云冰晶粒子、冰雹以及降水粒子散射测量的实验方法主要有(1)微波后向散射测试方法(2)FP腔方法(3)双站RCS快速测量方法(4)微波暗室测量法等,下面分别对其进行简述:

3.2.1 微波后向散射测试方法

Tolbert, J R在8.6—4.3mm波长下、Aden, A L在16.23cm波长、Labrum, N. R.在10cm波长和Gerhardt, J. R.等在3.2cm波长下做的实验测量^[16],南京大学的王庆安等人借鉴Tolbert, J R、Aden, A L、Labrum, N. R.等人的思想利用实验室微波元件自行设计了一套3.2cm的微波后向散射测量装置以对水滴以及冰球的进行了实验测

量,其结果与理论计算结果基本吻合^[17]。

3.2.2 FP腔测试法

Bryant以及L. J. Auchterlonie等利用35GHz频率下的开放腔对干冰球、梨状干冰球以及冰水混合干冰球的消光截面进行了实验的研究,实验中运用的计算公式为:

$$\sigma = \frac{\pi \omega_0^2 d}{2\lambda_0} \left[\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) + \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_0} \right) \right] \quad (3)$$

上式中 ω_0 为束腰半径, d 为镜面之间的距离, λ_0 为辐射的自由空间的波长, Q_0 为未扰动下谐振腔的Q因子, Q_1 、 Q_2 分别为放入测试球后以及移动 $\lambda/4$ 位置后腔体的扰动Q因子。利用公式(3)将测量得到的结果与Mie理论的结果进行了对比后发现吻合性较好^{[18][19]}。B. Mahmud and L. J. Auchterlonie^[20]利用10GHz频率下的开放腔双球的消光截面,该开放腔的曲率半径为10.5m,镜面的直径为1m,两个镜面的距离为4.85m,计算双球(大小以及材料属性均相同)互散射时的消光截面公式为:

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{t(pair)}}{\sigma_{t(one\ sphere)}} = \frac{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} - \frac{2}{Q_0}}{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} - \frac{2}{Q_0}} \quad (4)$$

上式中 Q_0 、 Q_1 以及 Q_2 为单个球时的情况,代表的含义与(3)式中解释相同, Q_1 为双球作为一个实体放入腔内时的Q因子, Q_2 为双球移动 $\lambda/4$ 时谐振腔的Q因子。

3.2.3 双站RCS快速测量法

1970年,M. Matsuo等人提出了“摆动法”测量目标的RCS,该方法的优点是测量过程简单,不需要微波暗室,缺点是数据率低,很难实现双站角接近180度的测量,为了克服这一点,1977年Hunka, Stovall等人提出了快速测量RCS的互易测量技术(RMT),该方法速度快,过程简单,采用微波电桥平衡法扣除了环境散射的影响,1983年,S. platnick, D. Lee等推导了双站复RCS的快速测量结果^[21]。南京大学的张尧培等人^[21]借鉴于M. Matsuo Hunka, Stovall, S. platnick, D. Lee等人的经验建立了一套X波段的粒子双站复RCS的测量系统(南大系统),整个系统可以放置在40平方米的普通实验室中,用微型计算机自动控制测量过程和处理数据过程,在对金属球进行测试时与理论结果吻合得较好,但是由于该双站RCS测试系统有一个镜像面,所以要求被测目标物至少有一个对称面,因此对于非对称目标物的测量问题还有待于解决。

3.2.4 微波暗室测量法

许小永,王振会等人利用中国航天工业总公司第 207 研究所的后向散射测量系统对扁椭球形雨滴以及冰粒的后向散射进行了测量,并与 DDA 的理论计算结果进行了对比。但是 DDA 在计算椭球状冰晶粒子的散射时存在着误差,因此如何利用 T-matrix 方法来计算椭球状粒子的散射以更好地对比实验测量结果成为一个有待解决的问题^[22],除此以外,许小永等人还利用该测试系统对球锥扁椭球形冰粒在三种波长(3.2cm、5.6cm、10.7cm)的极化波下进行了后向散射的测量^[23]。

4 结论与展望

卷云的辐射特性研究在国际上是一个研究的热点,世界各国一直非常重视卷云的研究,但是卷云的辐射强弱仍然是一个尚不能精确确定的影响因素。本文对卷云中常用的物理参数进行总结归纳,认为卷云冰晶粒子的典型尺度变化范围为 10 μm ~4000 μm ,形状模型主要有六角棱柱、中空六棱柱、六角平板、子弹花环、聚合物以及过冷水滴这几种。实际的探测资料表明,云中的粒子远比这些模型复杂,无法用简单的数学模型来描述,而且目前的研究中大都认为冰晶粒子为均匀各向同性的介质,缺少对各向异性且非均匀情况下的计算。粒子散射理论计算中,目前还没有一种方法可以精确快速地求解任意形状,任意尺寸的非球形粒子散射特性,因此设计一种混合的算法具有十分重要的意义。在实验室测量冰晶粒子的散射特性中,本文主要介绍了微波后向散射测量装置、FP 腔、双站 RCS 快速测量技术、微波暗室测量技术,这些测试的方法都存在着缺点,如何克服这些缺点,如何真实地模拟大气中云的冰晶粒子以及如何利用相关的测试仪器准确地测量冰晶粒子的散射特性将是一个极具挑战性的课题。南京信息工程大学电子与信息工程学院与中国气象局气象探测技术工程中心共建的“毫米波气象雷达系统重点实验室”配有毫米波雷达研究测试所需的各种实验装备,建有大型微波暗室、准 3m 法 EMC 电磁兼容实验室、电磁仿真实验室,除此之外还建有风洞实验室,如何利用微波暗室以及风洞实验室完成大气粒子的散射实验测量将是本人博士期间研究的一个重点方向。

参考文献

- [1] Dowling D R, Lawrence F R. A summary of the physical properties of cirrus cloud [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29:970-978.
- [2] Ping Yang, Heli Wei et al. Scattering and absorption property database for nonspherical ice particles in the near-through far-infrared spectral region [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(26): 5512-5523.
- [3] 仲凌志,刘黎平,葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 383-391.
- [4] Sassen, K., Z. Wang, V. I. Khvorostyanov et al. Cirrus cloud ice water content radar algorithm evaluation using an explicit cloud microphysical model [J]. *J. Appl. Meteorol.* 2002, 41: 620-628.
- [5] Yang. P., and K. N. Liou. Finite-difference time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996a, 13: 2072-2085.
- [6] Draine, B. T., and P. J. Flatau. Discrete-dipole approximation for scattering calculation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, 11: 1491-1499.
- [7] Mishchenko, M. I., L. D. Travis, and D. W. Mackowski. T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: A review [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer*, 1996, 55: 535-575.
- [8] Gallagher, M. W., J. Whiteway, M. J. Flynn, P. J. Connolly et al. An overview of the microphysical structure of cirrus clouds observed during EMERALD-1 [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2004, 131: 1143-1169.
- [9] Anthony J. Baran. A review of the light scattering properties of cirrus [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009: 1239-1260.
- [10] Gang Hong. Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies [J]. *Journal of Geophysical research*, 2007, 112: D11208, 1-11.
- [11] 张琳. 卷云的辐射传输与散射特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学硕士论文, 2010: 7-39.
- [12] Gang Hong. Radar backscattering properties of nonspherical ice crystals at 94GHz [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D22203, 1-11.
- [13] 葛德彪 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法(第三版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011: 3-4.
- [14] Rosalba Saija et al. Backscattered intensity from model atmospheric ice crystals in the millimeter-wave range [J]. *Optical Society of America*, 2001, 40(30): 5337-5342.
- [15] ZHIBO zhang. computation of the scattering properties of nonspherical ice crystals [D]. A Thesis of degree of MASTER OF SCIENCE, Texas A&M University, 2004: 57-78.
- [16] Gerhardt, J. R. etc., Experimental determinations of the backscattering cross-sections of water drops and of wet and dry ice spheres at 3.2 centimeters [J]. *J. Met.*, 1961, 2: 340-347.
- [17] 王庆安 钱珉 王景岚. 水滴和冰球后向散射截面的实验研究 [J]. *南京气象学院学报*, 1987, 10(3): 268-275.
- [18] L. J. Auchterlonie, B. Sc., D. phil., M. Inst. p. et al. Experimental study of Millimeter-wave scattering from simulated hailstones in an open resonator [J]. *IEE Proc.* 128, Pt. H, 1981, No. 5: 236-242.
- [19] Bryant, D. L., and Auchterlonie, L. J. Measurement of the extinction Cross-section of dielectric spheres using an open resonator [J]. *Electron. Lett.* 1978, 14: 475-476.
- [20] B. Mahmud and L. J. Auchterlonie. Measurement of mutual scattering effects Between spheres by using a microwave open resonator [J]. *Electron. Letter.*, 1981, 17: 977-978.
- [21] 张尧培 钱鉴. 双站雷达散射截面快速测量技术 [J]. *南京大学学报*, 1991, 27(1): 49-55.
- [22] 许小永,王振会,王庆安,等. 利用实验资料检验扁椭球形雨滴和冰粒后向散射 DDA 算法 [J]. *高原气象*, 2002, 21(1): 31-36.
- [23] 许小永,王振会,王庆安,等. 球锥扁椭球形冰晶后向散射实验与 DDA 计算研究 [J]. *南京气象学院学报*, 2002, 25(3): 307-313.