

非球形降水粒子测量模型的初步研究

冯婉悦, 余 勇, 姚振东

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:针对非球形降水粒子测量和雨滴体积重建的问题,首先讨论雨滴形状模型,认为BC模型(the model of Beard and Chuang)能准确地反应雨滴形状,并将雨滴按照等效尺度大小建模。然后结合降水粒子的图像扫描探测技术,分析线阵CCD对非球形降水粒子的扫描过程和粒子尺度、下落末速度的测量计算模型,并提出一种新的雨滴体积计算方法;为验证体积计算模型的有效性,选择CCD扫描频率30 kHz、像元数 1024×1024 、采样区域面积 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 对3 mm雨滴进行扫描仿真,体积仿真结果与BC模型积分体积对比,其误差约为0.2 %左右。结果表明,当粒子产生倾斜角时,需要对正、侧面投影分情况进行讨论。在此基础上,对测量模型中可能存在的误差进行探讨,并讨论了相关减小误差的方法,以期对下一步进行雨滴体积计算模型实验室实测数据的验证及其他相关研究做指导。

关键词:信号与信息处理;大气探测;非球形降水粒子;图像扫描探测技术;线阵CCD;雨滴体积测量

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

0 引言

降水粒子是指从云中降落到达地面之前还未完全蒸发的水汽凝(冻)结物。云雾滴和小雨滴保持球形,大雨滴及雪、冰粒等其他固态降水粒子由于受自身重力、周围空气压力等作用发生形变,成为非球形。由于雨滴在非球形降水粒子中的代表性,以雨滴为重点讨论对象。研究非球形降水粒子时,首先需要考虑粒子的形状。雨滴从云层中降落到地面时,其形状由大小决定。由于表面张力的作用,小雨滴在空气中降落时,保持球形。对于较大雨滴,随着尺度的增加,雨滴逐渐发生变形,成为近似椭球体或平底椭球^[1]。对于非球形降水粒子的描述,一般使用粒子尺度分布等效直径或最大尺度。早在19世纪末,国外就开始对雨滴形状、粒子尺度分布进行研究,主要有PB模型、PP模型、BC模型和近似椭球模型等。到20世纪中期,随着理论研究的深入、降水粒子探测技术的不断进步,并通过大量的实验及实际观测结果,对雨滴有了较为统一的近似描述,即:随着直径的增大,雨滴底部逐渐平坦、顶部圆滑,呈现近似“馒头”形状^[2]。

传统测量雨滴大小和谱分布的方法主要有吸水纸法、面粉法及浸润法等,由于这些方法测量精度低,工作量大,实时操作性差等缺点,现已逐步被淘汰^[3]。目前,光学技术在探测识别降水现象等气象领域得到

广泛应用,主要有:光散射法,光强衰减法,光阴影法,成像法等。其中,基于图像扫描的成像技术能够实现准确、实时、非接触测量,获得降水粒子的全方位信息,逐步成为探测降水粒子的主流。主要代表有2-DVD(two-dimensional video disdrometer)和HVSD(the hydrometeor velocity and shape detector),2-DVD利用两片正交光源,是目前能获得降水粒子信息最多仪器,可直接获取降水粒子的正、侧面形状、尺度、末速度等信息。但在实际应用中,容易受风的影响,存在粒子正、侧面投影匹配问题^[4]。HVSD采用两片平行光源,在粒子末速度测量上具有优势,但无法获取雨滴侧面信息。

从雨滴的形状概述、成像法测量原理及数学模型分析等方面进行讨论,对非球形降水粒子的测量模型进行了研究,以期为发展具有自主知识产权的光学雨滴谱仪,更好地服务于气象业务奠定基础。

1 雨滴形状模型

雨滴形状是研究非球形降水粒子的基础,是揭示降雨物理本质的重要微物理特性之一,在天气雷达定量估计降水等方面具有重要意义。对雨滴形状的现代理解开始于Pruppacher、Beard提出的PB模型,在UCLA云物理实验室的风洞中利用高速摄像机对雨滴形状进行研究^[1]。Pruppacher和Pitter把雨滴描述为椭球形状,将轴比作为雨滴形状的参数,即PP模型,这是首次对雨滴形状有了较为近似的描述。Beard、Chuang等综合考虑雨滴的表面张力、液体静压和空气

动压,对 PP 模型进行改进,给出雨滴的形状的 10 阶余弦级数的表示形式,即 BC 模型^[5-6]。

$$r(\theta)=a_0[1+\sum_{n=0}^{10}c_n\cos(n\theta)]\tag{1}$$

式中, $r(\theta)$ 表示角度 θ 对应的半径, a_0 为等体积球形雨滴的半径。分别选取 $a_0=0.5\text{ mm}$ 、 1 mm 、 1.5 mm 、 2 mm 、 2.5 mm 、 3 mm 、 3.5 mm 进行 BC 模型仿真,如图 1 所示。

此外,较为常用的雨滴形状模型还有 Ross 利用 BC 模型进行横截面近似,提出的近似椭球模型,主要应用于分析雨滴的近红外散射特性。PP 模型、BC 模型及近似椭球模型的仿真对比($a_0=2.5\text{ mm}$),如图 2 所示。PP 模型底部凹入,是由于利用拉普拉斯动力方程建立该模型时,对底部气流估计过大^[7]。

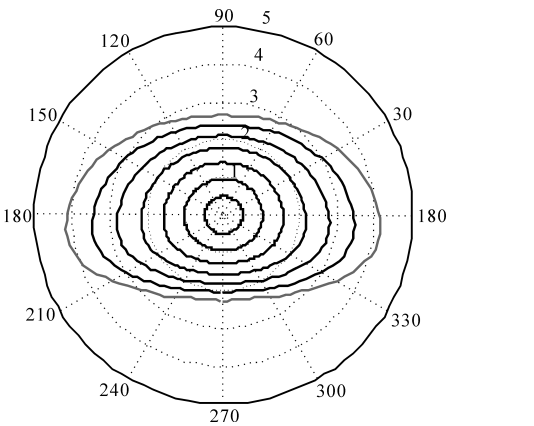


图 1 BC 模型($D_{eq}=2 a_0=1:1:7\text{ mm}$)

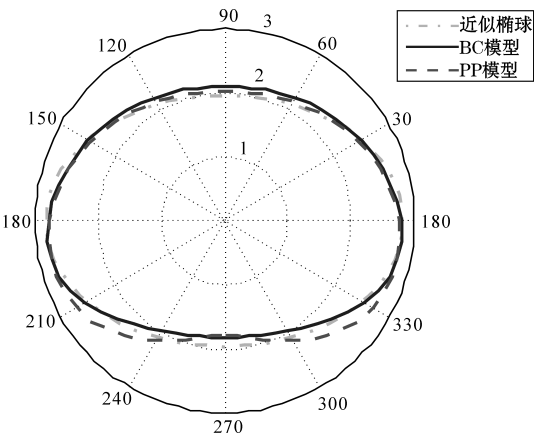


图 2 PP 模型、近似椭球模型、BC 模型对比

由图 1~2 可知,雨滴较小($a_0<0.5\text{ mm}$)时,雨滴基本保持球形,随着雨滴的增大($a_0\geq0.5\text{ mm}$),雨滴逐渐变为顶部圆滑、底部平坦。综合分析常见几种雨滴理论模型,并参考其他研究者关于雨滴形状的研究结论,目前,一致认为 BC 模型能较准确地反映雨滴的实际形状^[8]。

为此,对比、分析雨滴形状模型与等效半径之间的

关系后,初步考虑将雨滴按照其等效尺度(D_{eq})大小建模:当 $D_{eq}<1\text{ mm}$ 时,将雨滴建模为球形;当 $D_{eq}\geq1\text{ mm}$ 时将雨滴建模为 BC 模型。

2 基于线阵 CCD 扫描探测的非球形降水粒子重建

2.1 测量原理

图像扫描探测技术的重要特点是利用水平光带照射射线阵式 CCD 传感器,由 CCD 对测量区域进行扫描成像。当雨滴通过测量区域时,每次扫描获取降水粒子的部分信息,得到一个“切片”,同一个粒子将被扫描成若干切片,如图 3 所示。降水粒子以一定的下落末速度穿过采样区域,在 t_1, t_2, \dots, t_n 时刻被扫描,每扫描一个周期就存储一次数据,直至粒子离开采样区域。将获得的数据“切片”进行组合就可实现降水粒子的重建,同时,将采集到的数据进行计算处理,从而获得所需要的降水粒子信息,实现非接触、精细化测量^[9]。

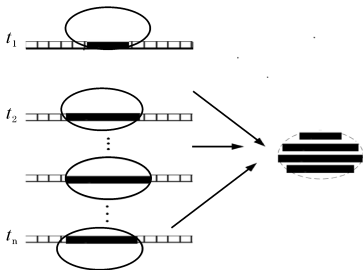


图 3 CCD 扫描重构原理图

在中国,基于线阵 CCD 图像扫描探测技术的光路系统主要采用一维测量光路,只能实测降水粒子的一维横向尺度,无法研究、讨论其非球形性质。为此,需对非球形降水粒子测量模型进行改进。为测量粒子的三维尺度,设置正交的两束测量光带,从 X 、 Y 两个方向对粒子进行成像扫描;为测量雨滴的末速度,需要让同一粒子依次穿越两束测量光带,分别扫描成像,计算粒子通过两束光带的时间差,完成粒子末速度的测量。

2.2 测量的数学模型

2.2.1 降水粒子三维尺度的测量

基于线阵 CCD 探测方法,粒子的尺度主要是根据遮挡的像元数量获得。假如粒子遮挡的像元数为 n ,像元单元尺寸为 a ,则第 k 次扫描的粒子横向切片尺寸为^[10]

$$w_k=na\tag{1}$$

降水粒子的实际横向尺寸为

$$w_k = \beta na \tag{2}$$

其中, β 为光学系统的放大倍率。同一降水粒子经过多次扫描,得到的最大尺寸 w_{\max} 为粒子长轴直径。基于设置的两束正交测量光带,可分别获得 X 、 Y 两个方向上的粒子尺度。

粒子的短轴直径为粒子扫描的最大纵向尺寸,通常不是直接测量,而是先测量或计算粒子末速度,再通过切片时间和数目计算。

由于大雨滴在非球形降水粒子中的代表性,以下描述均以雨滴为讨论对象。

2.2.2 雨滴末速度及扫描“切片”数

雨滴在下落过程中,速度不断增加,空气阻力也随之增加,当重力和阻力达到平衡时,雨滴将匀速下降,此时的下降速度称为雨滴末速度^[11]。雨滴末速度与 CCD 扫描频率有关。CCD 扫描频率 f 、同一粒子被扫描的次数 m 、雨滴末速度 v 末及粒子的高度 H 关系如下^[12-13]:

$$v_{\text{末}} = \frac{H}{m} \cdot f \tag{3}$$

以上是基于 CCD 扫描雨滴原理计算雨滴下落末速度。如果基于改进的测量模型,使用两路同向或正交 CCD 来测量雨滴的末速度,下落末速度还可表示为

$$v_{\text{末}} = \frac{d}{\Delta t}$$

式中: d 为上、下两路光源间距, $\Delta t = |t_n - t_1|$ 为粒子穿过扫描区域的时间。问题的难点在于 2 个光路 CCD 成像的同一粒子位置匹配。其中,末速度的准确测量是计算雨滴短轴直径的关键。

表 2 列出了静止空气中雨滴下落末速度实例。根据雨滴末速度测量模型,结合 BC 模型($H = 2c = r(0) + r(180)$),计算线阵 CCD 不同扫描频率时所获得的“切片”个数,如表 1 所示。

表 1 1013 hPa、20℃ 静止空气中水滴的下落末速度				
水滴直径/ mm	雨滴下落 末速度/ m · s ⁻¹	$f_1 = 10 \text{ kHz}$	$f_2 = 20 \text{ kHz}$	$f_3 = 30 \text{ kHz}$
		m1	m2	m3
1	4.03	2	5	7
2	6.49	3	6	9
3	8.06	3	7	10
4	8.83	4	8	11
5	9.09	4	9	13
6	9.17	5	10	15

注: f_1 f_2 f_3 表示 CCD 不同的线扫描频率

由表 1 可知,扫描频率在 20 kHz 以上时,不同尺度、不同下落末速度的降水粒子能被扫描获得具有一定差别数量的“切片”。基于线阵 CCD 降水粒子的图像扫描探测方法,需要根据系统对粒子直径测量范围的测量要求,尽可能保证不同尺度雨滴,所获得数据“切片”数具有差别的原则,选择合适的 CCD 扫描频率。同时,若扫描数据“切片”丢失,需要进行插值,进行恢复,重构降水粒子。

2.2.3 体积、等效直径

多数降水粒子都是非球形的,并且具有一定的空间取向^[14]。获取雨滴图像信息后,其等效直径计算的关键是建立合理的雨滴体积计算模型。一般建模时,将直径大于 1 mm 的雨滴认为是非球形。非球形粒子求体积的模型通常为体积分法。体积积分通常要知道其数学表达方程,在实际测量中,较难准确得到雨滴的数学表达式,因此直接积分难度较大。提出一种新的雨滴体积计算思路,即通过面积累加计算雨滴体积。基于建立的 BC 形状模型,其横截面近似为椭圆;考虑利用具有一定间距的两片正交光源,组成降水粒子的三维测量模型,即可获得雨滴正、侧面投影的各个扫描“切片”长度,由此来获得各层椭圆面的轴长,然后根据各扫描面积累加的思路得到雨滴体积。因此,雨滴总体积 V 的求解公式可表示为

$$V = \pi \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{2} width_{Ai} \right) \left(\frac{1}{2} width_{Bi} \right) \Delta h_i \tag{4}$$

其中: $width_{Ai}$, $width_{Bi}$ 分别表示 A 、 B 两个正交线阵 CCD 扫描得到的第 i 个“切片”横向尺寸;则 Δh_i 表示相邻各“切片”的高度。

通常,利用等体积球体定义降水粒子或雨滴的等效直径 D_{eq} ,故 D_{eq} 可表示为

$$D_{eq} = \sqrt[3]{6V/\pi} \tag{5}$$

3 MATLAB 仿真

为研究降水粒子体积重建方法,基于 BC 模型,对下落雨滴进行 CCD 扫描成像的 Matlab 仿真。仿真中假设雨滴的 CCD 成像清晰,没有扫描产生的误差。仿真参数设置为:假设扫描光路为 X 、 Y 正交方向的平行光带,线阵 CCD 扫描频率 30 KHz,像元数 1024,面积 100 mm×100 mm,降水粒子直径 3 mm,雨滴末速度采用 1013 hPa、20℃ 静止空气中水滴的下落末速度。

首先研究水平下落雨滴(雨滴长轴横截面水平)的体积重建。根据 BC 模型,获得直径 3 mm 降水粒子的形状轮廓;根据雨滴下落末速度、CCD 扫描频率及像元尺寸,确定各扫描线的大概位置。如图 4 所示,扫

描线间隔0.269 mm,假定理论最大横向尺寸位置 $r(0)$ 刚好被扫描到。计算扫描“切片”的尺度及间隔高度,结合式(4),估算雨滴体积。

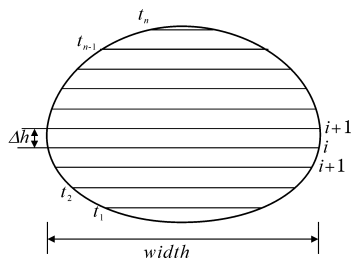


图4 CCD扫描仿真

当雨滴直径为3 mm时,其标准大气压下的雨滴下落末速度为8.06 m/s,故相邻扫描“切片”间距 Δh 为

$$\Delta h = v/f = 0.269 \text{ mm}$$

当雨滴以水平方式通过成像区域时,雨滴 X 、 Y 面的CCD投影情况一致,如图4所示。此时,按照此投影进行雨滴的三维重建,取 $width_{Ai} = width_{Bi}$ 。利用MATLAB程序获得各数据“切片”的横向尺寸,部分数据如下: $width(0) = 3.154 \text{ mm}$, $width(0.269) = 3.1 \text{ mm}$, $width(0.807) = 2.518$, $width(1.345) = 0.8205$, $width(-0.538) = 2.957$, $width(-1.076) = 1.8216$ 。将各数据代入式(4),计算结果为 14.16 mm^3 ,与BC模型体积积分(14.14 mm^3)、等体积球体积(14.137 mm^3)对比,其误差约为0.2%。

目前为止,几乎没有关于雨滴倾斜时,正、侧面投影情况的研究、讨论资料。首先考虑如果雨滴以 X 光带照射方向为转动轴线,长轴平面与水平光带倾斜一定的角度(18°)。对于 X 方向的光带,雨滴的CCD投影成像为一个倾斜的近似平底椭圆,如图5(a)所示。此时,若则不考虑 X 、 Y 投影是否一致问题,直接取 $width_{Ai} = width_{Bi}$ 。根据此投影,利用MATLAB程序获得各数据“切片”的横向尺寸。部分数据如下: $width_A(0) = 3.116 \text{ mm}$, $width_A(0.269) = 3.048 \text{ mm}$, $width_A(0.538) = 2.856$, $width_A(1.345) = 0.9212$, $width_A(-0.807) = 2.492$ 。计算结果为 13.99 mm^3 ,与BC模型积分体积对比,其误差约为-1.04%。

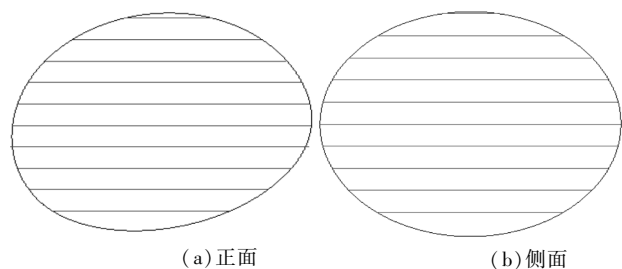


图5 降水粒子正、侧面投影

若采用改进的两路正交CCD测量模型,考虑正、侧面投影不一致。经过空间几何知识,可得,侧面投影为椭圆,如图5(b)所示。其长轴为粒子无倾斜时,横向尺度的长度3.154 mm。短轴为倾斜时,雨滴高度2.735 mm。此时 $width_{Ai}$ 、 $width_{Bi}$ 经过匹配,分别计算其大小。部分仿真数据如下所示: $width_A(0) = 3.116 \text{ mm}$, $width_A(0.269) = 3.048 \text{ mm}$, $width_A(1.345) = 0.9212$, $width_A(-0.269) = 3.054 \text{ mm}$; $width_A(-1.076) = 1.8216$; $width_B(0) = 3.154 \text{ mm}$, $width_B(\pm 0.269) = 3.0795 \text{ mm}$, $width_B(\pm 1.076) = 1.5866$ 。体积仿真结果 14.06 mm^3 与BC模型积分体积对比,其误差约为-0.56%。

4 误差分析

影响整个测量精度的因素有很多,有些可通过仪器校正避免或减少;而有些误差是所设计系统中所需元器件固有的或是测量数学模型中存在的,这些误差是不可避免的。

4.1 测量原理误差

提出新的雨滴体积重建模型是根据各个扫描线长度计算切片截面面积,然后乘以“切片”间隔高度。以雨滴无倾斜情况为例进行讨论,体积重建误差模型如图6所示。 t_1, t_2, \dots, t_{i-1} 时刻,相邻扫描“切片”间所覆盖的区域(图6矩形区域)均在粒子轮廓线内,由此雨滴各扫描切片的两端部分被忽略,导致各扫描截面面积有一定的缩小。由 $s = \pi \cdot width_{Ai}^2/4$ 计算,可得, $S(t_1) = 2.605 \text{ mm}^2$, $S(t_2) = 5.173 \text{ mm}^2$ 直至扫描至 $r(0)$ 。当扫描至 $r(0)$ 位置时, $s(t_{i-1}) = 7.809 \text{ mm}^2$ 。而在 t_i, t_{i+1}, \dots, t_n 时刻,即从 $r(0.269)$ 扫描位置开始,各扫描切片覆盖粒子轮廓线外的部分像元,由此增加的部分对雨滴下半部扫描切片丢失的部分进行了一定的补偿,可得, $s(t_i) = 7.544 \text{ mm}^2$, $s(t_{i+1}) = 6.448 \text{ mm}^2$,直到最后一个数据“切片”,从而其体积计算结果误差比较小。当粒子无倾斜时,无论用单一光源或者是正交平行光源,雨滴扫描切片的横截面均近似为圆,体积重建误差仅为0.2%,而雨滴长轴平面与水平光带倾斜一定的角度(18°)时,体积重建误差约为-0.56%,和水平下落雨滴的重建体积相比误差加大;利用单一平行光源时,因为无法获取雨滴侧面粒子信息,直接将其横截面近似为圆,进行计算,体积重建误差增大至-1.04%。

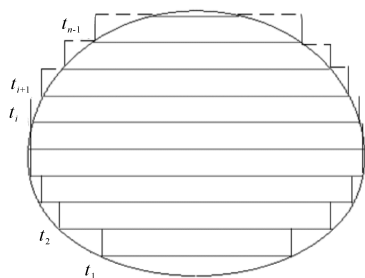


图6 体积重建误差模型

综合以上 Matlab 仿真及雨滴体积重建误差可以看出,在基于正交平行光带 CCD 扫描系统的测量数学模型中,假定降水粒子无倾斜通过采样区域,雨滴体积的重建误差很小。但在实际测量中,受风、降水粒子振动等因素的影响,降水粒子将产生倾斜、重叠等,会产生一定的累计误差,雨滴体积误差也会有所变大。故要减少误差,需选择合适的倾斜角修正方法^[15]和分情况讨论粒子正、侧面投影匹配问题,建立更为精确的雨滴体积重建模型。

4.2 线阵 CCD 的非均匀性

此外,参考其他研究者对降水粒子图像扫描探测技术的研究表明,在实际测量中,CCD 的非均匀性导致在相同光照强度的情况下,CCD 各像元输出的信号强度不同,从而使系统测量的降水粒子在相同下落位置时,获得的粒子尺度偏大或偏小。针对基于线阵 CCD 光学降水测量系统中,由线阵 CCD 非均匀性引起的测量误差,高太长、刘西川等提出将动态阈值与光学玻璃棒采样相结合进行校准^[16-17]。

4.3 其他因素的影响

此外,影响整个系统测量准确性还有:光源的发散性,均匀性,电压的稳定性,环境因素等。为减小这些因素的影响,系统可在光源及成像系统部分加设相应防护措施,从而提高测量系统的测量准确性和普遍适用性。

5 结束语

非球形降水粒子图像扫描探测结合光电探测技术和图像处理技术,通过对数据“切片”的重建、计算,可以直接获取降水粒子的形状、尺度、下落末速度等微物理特征信息,进而测定降水粒子的滴谱分布,为天气雷达定量估测降水提供定标的依据。

介绍非球形降水粒子的图像扫描探测方法,结合在此领域的初步探索工作,对雨滴形状模型及线阵 CCD 应用于非球形降水粒子测量的计算模型和误差

进行讨论和分析,认为 BC 模型能较准确地反映雨滴的实际形状。基于 BC 模型,根据设定的 CCD 扫描参数,对 3 mm 雨滴进行仿真,体积仿真结果与 BC 模型积分体积对比,其误差约为 0.2 % 左右;粒子倾斜 18° 时,其误差约为 -0.56 %。在雨滴体积重建的 Matlab 仿真中,雨滴末速度采用理论数据,未考虑末速度的实际测量,在后续的研究中需加以考虑;另外,在讨论中也未考虑粒子的成像质量、成像阈值的设定等问题,在下一步的工作中,将考虑按照像素离散化切片数据,然后进行粒子体积重建仿真。通过以上的初步研究,认为非球形降水粒子的测量模型需要从建立合适的雨滴模型及多维的 CCD 光路系统出发仔细研究,以期对下一步的研究工作做出指导。

参考文献:

- [1] 刘西川,高太长,刘磊,等. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展[J]. 地球科学进展,2013,28(11):1217-1216.
- [2] Beard K V, Bringi V N, Thurai M. A new understanding of raindrop shape [J]. Atmospheric Research, 2010,97: 396-415.
- [3] 伍伟雄. 环境试验设备参数测量——淋雨试验设备[J]. 环境技术,2012,6:39-42.
- [4] 朱亚乔,刘元波. 地面雨滴谱观测技术及特征研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(6):685-694.
- [5] Beard K V, Chuang C. A new model for the equilibrium shape of raindrops[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,1987,44(11):1509-1524.
- [6] Schonhuber M, Lammer G, Randeu W L. One decade of imaging precipitation measurement by 2D-video-distrometer [J]. Advances in Geosciences, 2007, 10: 85-9.
- [7] Pruppacher H R, Pitter R L. A semi-empirical determination of shape of cloud and raindrops [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1971, 28(1):86-94.
- [8] Thurai M, Bringi V N. Drop axis ratios from a 2D Video disdrometer[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005,22(7):966-978.
- [9] Barthazy E, Goke S, Schefold R, et al. An optical array instrument for shape and fall velocity measurements of hydrometeors [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(9):

- 1400-1416.
- [10] 何清芳,王青梅,郭利乐,等. 基于 CCD 扫描技术探测降水现象的研究[J]. 气象水文海洋仪器,2013,(2):26-29.
- [11] 曲立国,黄友锐,唐超礼,等. 基于 FPGA 的线阵 CCD 雨滴图像快速连续识别方法[J]. 光电工程 39(10):104-110.
- [12] 苏小勇,吴宜,单陈华. 不同大气条件下雨滴降落末速度研究[J]. 气象水文装备,2012,23(2):50-53.
- [13] Beard K V, Prupacher H R. A determination of the terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel [J]. Journal of the Atmospheric Science, 1969, 26(10):1066-1072.
- [14] Kruger A, Krajewski W F. Two-dimensional video disdrometer : a description [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 602-617.
- [15] Huang G J, Bringi V N, Thurai M. Orientation angle distributions of drops after an 80m fall using a 2D video disdrometer [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(9): 1717-1723.
- [16] 岑家生,王青梅,罗辉,等. 降水粒子的成像探测技术及仪器初探[J]. 大气与环境光学学报,2011,6(6): 415-422.
- [17] 江志东,高太长,苏小勇,等. 基于线阵图像传感器的降水测量技术研究[J]. 大气与环境光学学报,2013,8(1): 37-45.

A Preliminary Study on the Measurement Model of Non-spherical Precipitation Particles

FENG Wan-yue, SHE Yong, YAO Zhen-dong

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Aiming at the problem of the non-spherical precipitation particle measurement and the raindrops volume reconstruction, this paper first discussed the raindrops shape model, and proved that BC model can reflect the actual shape of the rain, and the raindrops were modeled according to their equivalent size. Then, combined with the image scanning technology for detecting precipitation, the scanning process of linear array CCD for non-spherical precipitation particle and particle size and fall terminal velocity calculation model were analyzed, and a new method of raindrops volume calculation was presented; To verify the feasibility of the new method, select CCD scanning frequency 30 kHz, Pixel number 1024×1024, sampling area 100 mm×100 mm 3 mm raindrops scan and simulate, and the volume simulation results were compared with the integral volume of BC model, and the error was about 0.2 %. The results show that when the angle is produced, it is necessary to discuss the situation of the positive and the side projection. On this basis, the possible errors in the measurement model and the related methods to reduce the errors were discussed in order to guide the verification of volume calculation with experimental data and others related research.

Key words: signal and information processing; atmospheric sounding; non-spherical precipitation particle; image scanning technology; linear array CCD; volume measurement