

基于粒子成像测速技术的雨滴微物理特性研究*

刘西川¹⁾ 高太长^{1)†} 刘磊¹⁾ 翟东力²⁾

1) (解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101)

2) (南京英恩特环境技术有限公司, 南京 211101)

(2013年7月27日收到; 2013年9月12日收到修改稿)

为了获取自然环境条件下的雨滴形状、尺度、速度、取向等微物理特性, 基于粒子成像测速的瞬态测量可视化技术, 研究基于点扩散函数的图像复原算法和自相关图像的速度提取算法, 设计并研制了一种基于面阵电荷耦合元件的自然降水成像测速系统. 通过外场观测试验研究了雨滴的直径、速度、轴比和空间取向及其谱分布等微观物理特性; 雨滴的速度随直径的增大呈指数增大, 轴比随直径的增大呈线性减小, 空间取向易受环境风的影响, 倾斜角的平均值在 2.1° 左右, 标准偏差为 11.5° ; 基于实测数据拟合了雨滴速度和轴比随直径的变化关系. 与国外已有模型相比, 本文进一步得出了具有本地化特征雨滴微物理特性. 所得到的结论对于云降水物理学研究、天气雷达地面定标、雨致微波衰减评估等方面的应用具有重要的意义.

关键词: 面阵电荷耦合元件, 雨滴, 成像测速, 微物理特性

PACS: 92.60.Jf, 42.79.Pw, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.63.029203

1 引言

雨滴在重力作用下自由降落时, 具有不同的形状、大小、速度、空间取向和摆动等多种微物理特性^[1]. 尤其是形状, 由于受到表面张力、空气动力、内部压力等多种力的作用, 其形状并不是绝对球形, 而是随直径的增大呈底部平坦、顶部圆滑的形状. 这些特性在云降水物理学研究^[2]、天气雷达地面定标^[3]、雨致微波衰减评估^[4]等方面有重要作用. 目前在这些领域中的应用往往采用经验假设, 但与实际情况并不完全符合, 造成一定的误差. 尤其由于受到多种复杂自然条件的影响, 雨滴的微物理特性成为气象、无线电通讯等领域关注和研究的重点^[5,6].

目前业务应用中雨量筒、翻斗式雨量计仅能够测量降雨量和降雨强度, 无法测量微观特征^[7]; 基于撞击法的 Joss-Waldvogel 雨滴谱仪可以得到雨滴的大小及其分布^[8], 但是无法测量雨滴的形状和速度^[9]; 基于线阵扫描法的 OTT PARSIVEL 激光

雨滴谱仪^[10]、二维视频雨滴谱仪^[11]等可以获取降水粒子的剖面信息, 但是速度是根据形状假设进行估计的, 因而存在较大误差, 粒子穿过测量区域存在水平位移时会导致粒子图像的变形^[12]; 基于直接成像法的降雨成像系统^[13]可以直接获取雨滴图像, 但是无法测量速度, 而且存在景深效应; 高速摄像机可以测量垂直风洞内的雨滴形状、摆动和内部环流等参数, 但是仅限于实验室内研究, 无法得到自然条件下的雨滴特性^[14]. 目前来看, 自然条件下雨滴微物理特性的准确获取尚未得到很好的解决, 国内外多个研究机构仍在开展这方面的研究工作.

粒子成像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术^[15]是随着图形图像分析技术的发展而发展起来的, 具有非接触式、全场、瞬态及定量测速等优点, 广泛应用于柴油喷雾、气固多相流动及离心泵内部流场等流体力学和空气动力学领域. 传统 PIV 技术大多应用于实验室测量, 本文提出将 PIV 技术应用于自然环境下降水的测量, 研究单帧双曝光技术、基于点扩散函数的图像复原算法和自相关

* 国家自然科学基金科学仪器基础研究专款 (批准号: 41327003) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: 2009gaotc@gmail.com

图像的速度提取算法, 研制自然降水成像测速系统并进行实际测量, 重点分析雨滴的形状、轴比、速度、空间取向及其谱分布等微物理特性.

2 系统结构与测量原理

自然降水成像测速系统由点光源、扩束透镜组、滤光片、成像透镜组、电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 面阵图像传感器及其驱动电路、采集与控制单元和计算机终端组成, 如图 1 所示. 其中, 点光源为 CCD 成像提供稳定而均匀的平行光; 扩束透镜组将光束扩束, 经滤光片滤光后投射到成像透镜组, 二者构成有效采样空间 (300 mm × 40 mm × 30 mm); CCD 图像传感器将接收到的光强信号转换为数字图像信号; 采集与控制单元由数字信号处理芯片 DSP 和复杂可编程逻辑器件 CPLD 等组成, 实现图像数据的实时采集、预处理与传输控制等; 图像数据传输到计算机终端后, 实现对图像数据的进一步处理、降水信息提取和存储等功能. 点光源采用中心波长为 460 nm 的单色光源, 光谱宽度为 25 nm, 滤光片采用带宽为 15 nm 的窄带滤光片, 在此范围内瑞利散射效应很小, 因此可以忽略其对成像造成的影响.

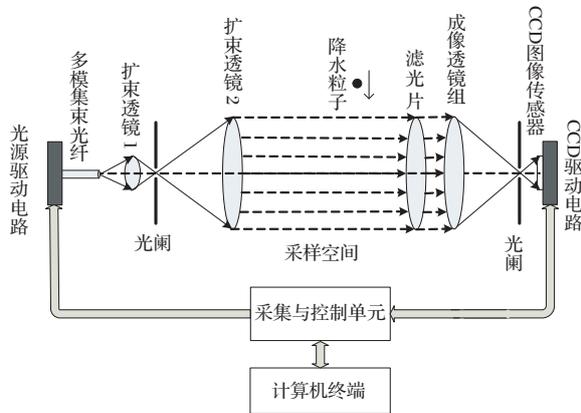


图 1 自然降水成像测速系统的组成示意图

面阵 CCD 图像传感器的单次曝光时间为 20 μs, 在这一时间段内降水粒子的运动基本上可以忽略, 因而不需要考虑由于粒子水平运动造成的拼合图像修正, 有效解决传统线阵式雨滴谱仪在大风条件下测量精度差的问题. 降水粒子在穿过采样空间时, 面阵 CCD 图像传感器以一定的频率对降水粒子进行快速扫描成像, 在光阑和快门的控制下实现单帧图像内的二次曝光. 根据粒子图像可以得到降水粒子的大小和形状; 根据粒子先后两次曝

光的位置和曝光间隔时间可以计算降水粒子的水平运动速度和垂直运动速度. 图 2 为成像示意图.

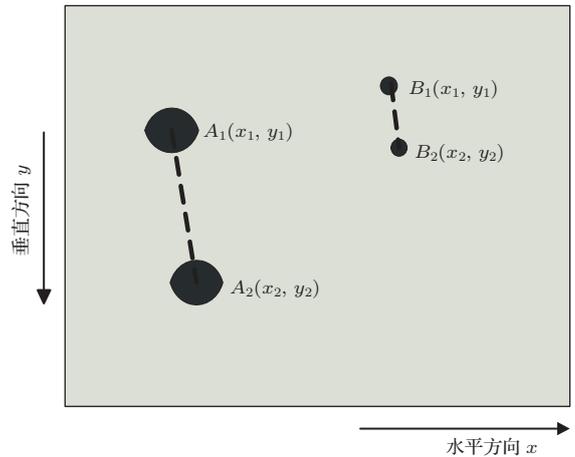


图 2 自然降水成像测速系统的成像示意图

3 系统理论分析

本系统选用 CCD 图像传感器的像素分辨率为 640 × 480, 扫描频率为 25 fps, 为了提高采样频率, 本系统采用非隔行扫描方式, 从而使扫描频率提高到 50 fps, 像素分辨率为 640 × 240. 对应的实际测量区域面积为 40 mm × 30 mm, 因此单个像素在水平方向上的尺寸分辨率为 0.0625 mm, 在垂直方向上的尺寸分辨率为 0.125 mm. 这一分辨率满足雨滴图像的分辨率要求, 重点是要保证在同一视场内捕捉粒子的连续两次曝光, 因而曝光间隔和粒子捕获概率是确保粒子图像对完整捕捉和微物理特性准确测量的基础.

由于本系统是采用间隔曝光的方式对降水粒子进行采集的, 并非每一个穿过采样空间内的降水粒子均能够被 CCD 采集到, 因此完整捕获一对雨滴图像存在一定的概率. 雨滴在大气中自由落体的降落末速度为 [16]

$$V(D) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D_{eq}), \quad (1)$$

其中 D_{eq} 为雨滴的等效直径, 如图 3 所示. 不同大小雨滴的速度存在很大的差别, 要保证在单帧内捕捉两次曝光的雨滴图像, 不发生重叠且不出采样空间, 两次曝光之间必须保持一定的时间. 对于曝光间隔时间 $T_{interval}$, 在采样空间内能够完整捕获到雨滴两次曝光图像的概率为

$$Prob(D) = \frac{H - D_V - V(D) \cdot T_{interval}}{V(D) \cdot 20 \text{ ms}}, \quad (2)$$

其中, H 为采样空间的高度, D_V 为粒子在垂直方向上的高度, $V(D)$ 为粒子的垂直运动速度, 20 ms 为单帧的曝光时间.

分别将曝光间隔时间设为 1, 2 和 3 ms, 捕获概率如图 3 所示. 由图可知, 不同间隔时间条件下雨滴具有不同的捕获概率, 且捕获概率随着雨滴直径的增大而显著减小. 当雨滴直径小于 0.5 mm 时, 三者基本保持一致, 而当雨滴直径大于 0.5 mm 时, 捕获概率从大到小依次为 1, 2 和 3 ms, 当雨滴直径大于 4 mm 时, 间隔时间 3 ms 的捕获概率小于 0, 即无法保证完整捕获两次曝光图像. 因而综合确定曝光间隔时间为 2 ms.

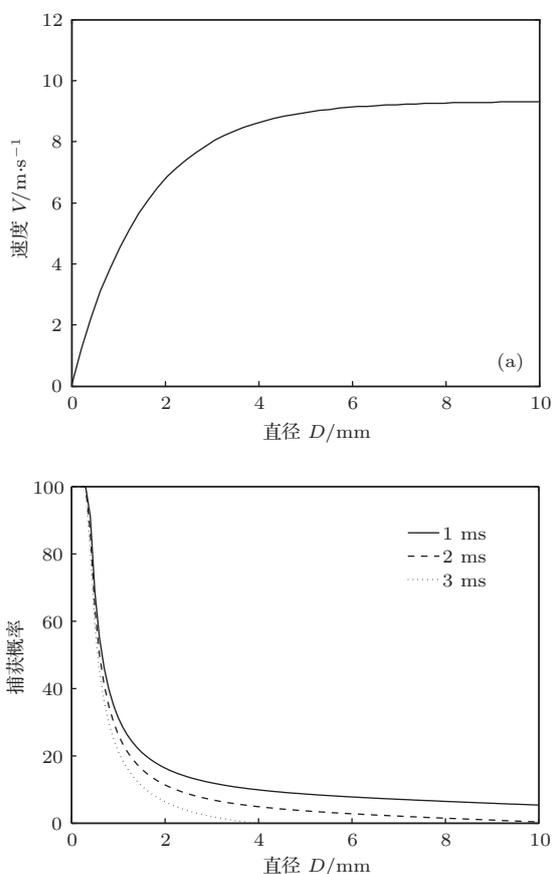


图3 雨滴的速度及相应捕获概率

鉴于这一捕获概率, 直接采样得到的雨滴谱分布 $N_{\text{sample}}(D)$ 并非真实谱分布, 必须经过捕获概率的修正才能得到真实谱分布:

$$N(D) = \frac{N_{\text{sample}}(D)}{S \cdot \text{Prob}(D)}. \quad (3)$$

其中, S 为有效采样空间.

4 数据处理算法

4.1 基于点扩散函数的图像复原

通过前期试验发现, 由于受到光学衍射、散焦、镜头污染以及仪器噪声等多种因素的影响, 雨滴图像往往存在模糊效应, 从而给边缘检测、二值化处理和特征提取带来困难, 尤其是对像素级的粒子. 考虑到曝光时间很短, 其间的位移可以近似忽略, 因此散焦模糊是图像退化的主要原因. 为了得到雨滴的清晰图像, 本文选用点扩散函数 (PSF) 对图像进行复原. 图像的退化模型为

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (4)$$

其中, $g(x, y)$ 为退化图像, $f(x, y)$ 为理想图像, $h(i, j)$ 为点扩散函数 PSF, $n(x, y)$ 为加性噪声. 对于本文中光学系统散焦造成的模糊, PSF 为一个圆盘函数:

$$h(i, j) = \begin{cases} 1/(\pi R^2) & \sqrt{i^2 + j^2} \leq R \\ 0 & \sqrt{i^2 + j^2} > R \end{cases}, \quad (5)$$

其中, R 为散焦半径. 经过试验确定点扩散函数的半径 R 取值为 5, 其模型如图 4(a) 所示. 以直径 2 mm 的粒子图像为例, 分别进行滤波、复原、二值化以及边缘检测处理, 结果如图 4 所示. 由图可知, 经过滤波、复原和二值化处理后, 可以得到清晰的雨滴图像, 经过边缘检测处理后可以得到清晰的雨滴轮廓特征, 这为雨滴微物理特征的进一步提取提供了准确图像信息.

4.2 基于自相关图像的速度提取

对于 2 次曝光的粒子成像在同一张图像上的自相关图像, 大多利用快速傅里叶变换 FFT 法来实现^[17]. 但是这一方法是基于视场内粒子速度基本一致这一假设的, 对于具有不同速度的雨滴则不适用. 因此本文采用粒子轨迹追踪法, 通过跟踪视场内每个雨滴的运动, 根据其在每一副图像中的位移和曝光时间间隔来计算雨滴的水平速度和垂直速度:

$$\begin{cases} v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \\ v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \end{cases} \quad (6)$$

4.3 特征提取算法

雨滴图像包含了丰富的细节信息, 基于此可以得到雨滴的精细微物理特征, 具体算法为:

1) 面积区域 R 内所包含的降水粒子像素点的总数

$$A_R = \sum_{(x,y) \in R} 1; \quad (7)$$

2) 长轴降水粒子图像轮廓上相距最远的两个像素点之间连线

$$E_A = \max_{p_i, p_j \in C} [D(p_i, p_j)]; \quad (8)$$

3) 短轴与长轴垂直且最长的目标轮廓上两个

像素点之间连线

$$E_B = \max_{p_i, p_j \in C, p_i p_j \perp E_A} [D(p_i, p_j)]; \quad (9)$$

4) 等效直径与雨滴等体积的球体直径, 通过长轴和短轴得到

$$D_{eq} = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{-1/3} = (E_A^2 E_B)^{-1/3}; \quad (10)$$

5) 轴比, 即短轴与长轴之比

$$\alpha = \frac{E_B}{E_A}; \quad (11)$$

6) 倾斜角, 即雨滴的对称轴 (短轴) 与垂直方向的夹角, 如图 5 所示;

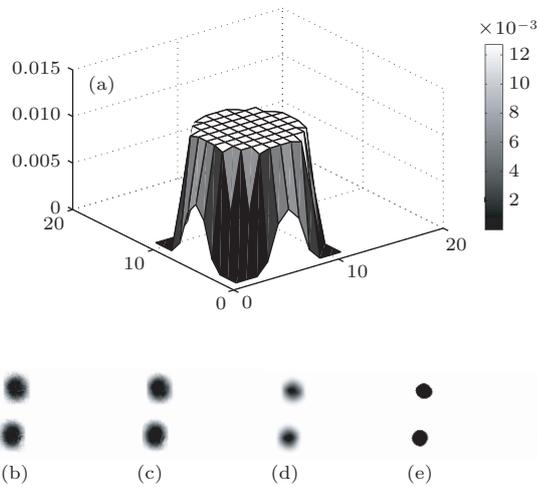


图 4 PSF 模型与雨滴图像 ($D = 2 \text{ mm}$) (a) PSF 模型; (b) 原始图像; (c) 滤波后图像; (d) 复原图像; (e) 二值化图像; (f) 粒子边缘

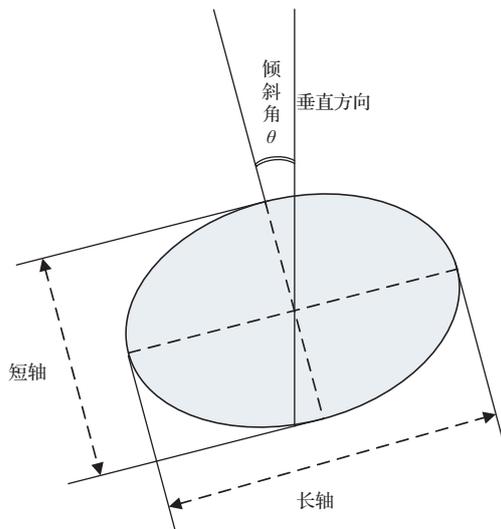


图 5 雨滴的倾斜角示意图

7) 降水强度根据雨滴的谱分布 $N(D)$ 累加

得到

$$R = \frac{\pi}{6} \sum N(D) \rho D^3 V(D), \quad (12)$$

其中, ρ 为雨滴密度, $V(D)$ 为雨滴的速度谱分布.

5 雨滴微物理特性的实测分析

利用该系统在南京地区进行了外场观测实验, 在 2013 年 5 月 9 日上午 7:00—8:00 时间段内共采集得到 39216 帧图像, 其中 6317 幅有效雨滴图像, 因此雨滴对的完整捕获概率为 16.1%. 如图 6 为采集的部分雨滴图像, 可以看到, 雨滴图像具有清晰的边缘和轮廓, 据此可以计算得到雨滴的直径、轴比、取向等.

图 7 分别列出了雨滴的尺度谱分布、速度谱分布、轴比分布和倾斜角分布. 由于当时降雨强度较弱 ($R = 2.5 \text{ mm/h}$), 因此雨滴分布以小滴为主, 平

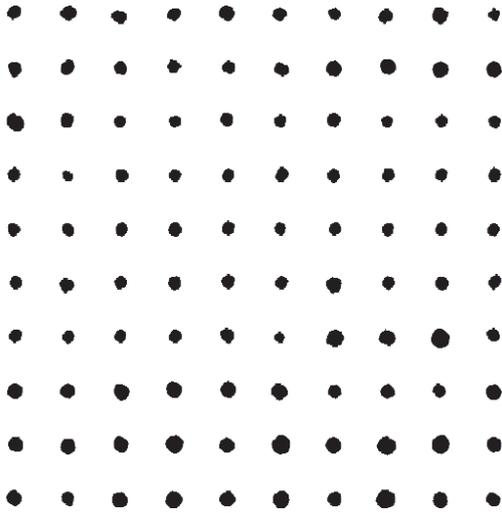


图6 雨滴图像

均直径为0.6 mm, 中值直径为0.6 mm, 平均体积直径为0.8 mm, 质量加权平均直径为1.1 mm, 最大直径为2.2 mm, 其中, 直径为0.5 mm的雨滴数密度最大, 为 $190 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$. 经 Gamma 谱分布

拟合, 得到谱分布函数为 (如图 7(a)):

$$N(D) = 2.248 \times 10^6 D^{6.87} \exp(-9.68D). \quad (13)$$

由于少量雨滴会溅落到仪器外罩上, 发生破碎后穿过采样空间, 从而形成速度异常点, 影响真实的雨滴速度特征, 因此必须剔除掉这些异常点. 剔除后的有效数据如图 7(b) 所示, 由图可知, 雨滴的速度随直径的增大而显著增大, 实测数据与 Atlas 雨滴速度的经验关系^[18] 相比有较好的一致性. 本文进行非线性拟合后得到速度经验关系见 (14) 式, 拟合得到的速度略大于 Atlas 经验关系, 这是由于当时存在 8 m/s 左右的风, 强风不仅会导致雨滴倾斜降落, 实际观测到的倾斜角最大会超过 45° , 而且仪器本身架构会影响正常的空气流场特性^[12], 在仪器采样空间, 尤其是在两个镜头附近会出现扰流或乱流, 在此处会增大或减小原有的雨滴速度, 风速越大会导致这一误差越大^[19,20].

$$v(D) = 9.75 - 10.8 \exp(-0.68D). \quad (14)$$

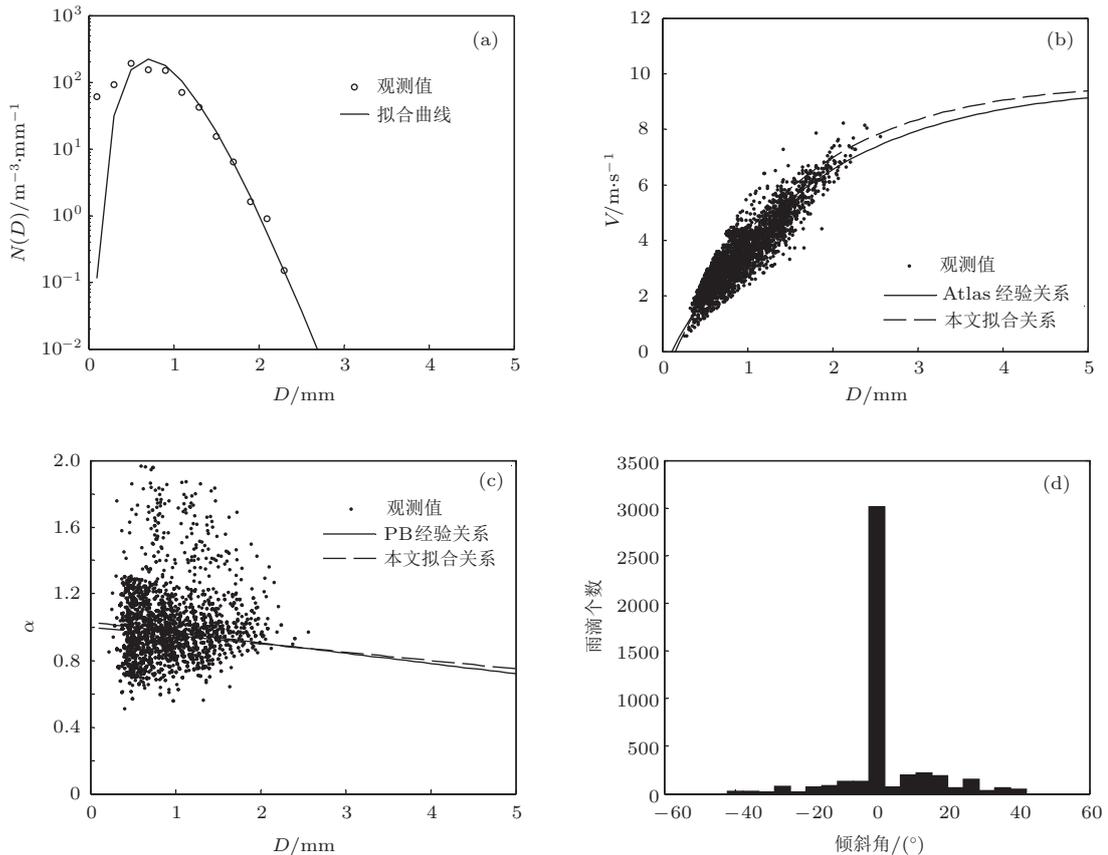


图7 雨滴微物理特性的谱分布 ($R = 2.5 \text{ mm/h}$) (a) 尺度谱分布; (b) 速度谱分布; (c) 轴比分布; (d) 倾斜角分布

雨滴的轴比随直径的增大而减小, 利用线性拟合得到轴比经验关系见 (15) 式, 实测数据与拟合曲线如图 7(c) 所示. 由图可知, 实测数据在大滴段与

Pruppacher 和 Beard (PB)^[21] 轴比经验关系存在较好的一致性, 但是在小滴段的分散度较大; 而拟合曲线在小滴段 ($D < 2 \text{ mm}$) 略小于 PB 经验关系,

在大滴段略大于PB经验关系;考虑到轴比随直径的线性关系,雨滴直径小于1 mm时轴比大于0.96,对轴比的影响很小,因而小滴段的分散影响并不大,重点是大雨滴的轴比特征.下一步试验考虑在大雨时采集更多的大雨滴,重点分析大雨滴轴比随直径的变化特征.

$$\alpha = 1 - 0.1D/2. \quad (15)$$

对于雨滴的倾斜角(如图7(d)),经统计得到雨滴倾斜角的平均值为2.1°,标准偏差为11.5°,略大于文献[22]中的平均值0°,标准偏差7°—8°,主要原因是当时存在8 m/s左右的风,从而导致雨滴的倾斜,而且空间取向存在较大的变化范围.

6 结 论

从粒子成像测速技术出发,本文提出了一种利用精密控制曝光的单面阵CCD图像传感器对降水粒子形状和速度进行同步测量的方法,研制了自然降水成像测速系统,研究了基于点扩散函数的图像复原方法、基于自相关图像的粒子速度提取方法和降水粒子特征提取算法.通过外场观测试验研究了雨滴的直径、速度、轴比和空间取向及其谱分布等微观物理特性;雨滴的速度随直径的增大呈指数增大,轴比随直径的增大呈线性减小,空间取向受风的影响较大,倾斜角的平均值在2.1°左右,标准偏差为11.5°;并基于实测数据拟合了雨滴速度和轴比随直径的变化关系.与国外已有模型相比,本文进一步得出了具有本地化特征的雨滴微物理特性.

利用这一系统,还可以对雪花、冰雹、霰等不同类型降水粒子的微物理特性进行测量,不仅可以揭示不同降水粒子的微物理特征,而且有助于促进降水微观特征在云降水物理学研究、天气雷达地面定标、降水微波衰减评估等方面的应用,因而具有广阔的应用前景和重要的现实意义.

感谢南京英恩特环境技术有限公司在系统硬件搭建中的工作.

参考文献

- [1] Sheng P X, Mao J T, Li J G, Zhang A C, Sang J G, Pan N X 2003 *Atmospheric Physics* (Beijing: Beijing University Press) p304 (in Chinese) [盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 张霁琛, 桑建国, 潘乃先 2003 大气物理学 (北京: 北京大学出版社) 第304页]
- [2] Szakall M, Mitra S K, Diehl K, Borrmann S 2010 *Atmos. Res.* **97** 416
- [3] Schuur T J, Ryzhkov A V, Zrnica D S, Schonhuber M 2001 *J. Appl. Meteor.* **40** 1019
- [4] Liu X C, Gao T C, Qin J, Liu L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2156 (in Chinese) [刘西川, 高太长, 秦健, 刘磊 2010 物理学报 **59** 2156]
- [5] Zhou X, Yang X F, Li Z W, Yu Y, Ma S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 149202 (in Chinese) [周旋, 杨晓峰, 李紫薇, 于暘, 马胜 2012 物理学报 **61** 149202]
- [6] Jiang S T, Gao T C, Liu X C, Liu L, Liu Z T 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154303 (in Chinese) [姜世泰, 高太长, 刘西川, 刘磊, 刘志田 2013 物理学报 **62** 154303]
- [7] Gao T C 2012 *Meteor. Hydro. Equip.* **23** 1 (in Chinese) [高太长 2012 气象水文装备 **23** 1]
- [8] Joss J, Waldvogel A 1967 *Pure Appl. Geophys.* **68** 240
- [9] Tokay A, Kruger A, Krajewski W F 2001 *J. Appl. Meteor.* **40** 2083
- [10] Löffler-Mang M, Joss J 2000 *J. Atmos. Ocean. Technol.* **17** 130
- [11] Gao T C, Jiang Z D, Liu X C, Su X Y, Zhai D L 2012 *Opt. Pre. Eng.* **20** 2184 (in Chinese) [高太长, 江志东, 刘西川, 苏小勇, 翟东力 2012 光学精密工程 **20** 2184]
- [12] Nespor V, Krajewski W F, Kruger A 2000 *J. Atmos. Ocean. Technol.* **17** 1483
- [13] Saylor J R, Jones B K, Bliven L F 2002 *Rev. Sci. Ins.* **73** 2422
- [14] Szakall M, Diehl K, Mitra S K, Borrmann S 2009 *J. Atmos. Sci.* **66** 755
- [15] Tang Y H, Xie G Y, Liu H C, Shao J B, Ma Q, Liu H P, Ning H, Yang Y, Yan C H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2257 (in Chinese) [唐远河, 解光勇, 刘汉臣, 邵建斌, 马琦, 刘会平, 宁辉, 杨彧, 严成海 2006 物理学报 **55** 2257]
- [16] Hanesch M, Waldvogel A, Schonhuber M, Randeu L 1998 *American Meteorological Society Conference on Cloud Physics* Everett Washington, August 17–21, 1998 p407
- [17] Xu L F, Chen G, Li J Z, Shao J B 2003 *Adv. Mech.* **33** 533 (in Chinese) [许联锋, 陈刚, 李建中, 邵建斌 2003 力学进展 **33** 533]
- [18] Atlas D, Ulbrich C W 1977 *J. Appl. Meteor.* **16** 1322
- [19] Habib E, Krajewski W F, Nespor V, Kruger A 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 19723
- [20] Nespor V, Sevruk B 1999 *J. Atmos. Ocean. Technol.* **16** 450
- [21] Beard K V, Chuang C 1987 *J. Atmos. Sci.* **44** 1509
- [22] Huang G J, Bringi V N, Thurai M 2008 *J. Atmos. Ocean. Technol.* **25** 1717

Research on microphysical property of raindrops based on particle imaging velocimetry technology*

Liu Xi-Chuan¹⁾ Gao Tai-Chang^{1)†} Liu Lei¹⁾ Zhai Dong-Li²⁾

1) (College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

2) (Ying EnTe Environment Technique Co.LTD, Nanjing 211101, China)

(Received 27 July 2013; revised manuscript received 12 September 2013)

Abstract

In order to obtain the shapes, sizes, fall velocities, orientations of raindrops in the natural condition, starting from the particle imaging velocimetry transient visual measurement technology, an image restoration algorithm based on point spread function and a velocity calculation algorithm based on auto-correlation image are investigated, and a natural precipitation imaging velocimetry system based on a CCD sensor is designed and developed in this paper. The diameters, terminal velocities, axis ratios, orientations and their distributions of raindrops are investigated by the field experiment. The velocities of raindrops increase exponentially with the diameter, and axis ratios of raindrops decrease linearly with the diameter, the orientations of raindrops are easily affected by the wind, the average canting angle for all drops tends to be nearly symmetric 2.1° with a standard deviation of 11.5° . The empirical relations between velocity and diameter, between axis ratio and diameter are fitted by nonlinear fitting and linear fitting of observed data. In this paper we further provide microphysical characteristics of raindrops with local features. compared with those from the existing model. These conclusions are of important significance for the research on cloud precipitation physics, ground calibration of weather radar, assessment of rain induced microwave attenuation, etc.

Keywords: planar array CCD, raindrops, imaging velocimetry, microphysical features

PACS: 92.60.Jf, 42.79.Pw, 42.30.-d

DOI: [10.7498/aps.63.029203](https://doi.org/10.7498/aps.63.029203)

* Project supported by the Special Fund for Basic Research on Scientific Instruments of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41327003).

† Corresponding author. E-mail: 2009gaotc@gmail.com