

# 基于机器视觉的细水雾液滴尺寸测量与分析

袁江涛<sup>1,2</sup> 杨立<sup>1</sup> 王小川<sup>1</sup> 张健<sup>1</sup> 金仁喜<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033; <sup>2</sup> 海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

**摘要** 为了满足科研与工程中对细水雾液滴尺寸测量的高精度低成本要求,对雾滴尺寸的机器视觉测量方法进行了深入研究。在自行建立的高压喷雾系统与雾滴采集装置上对细水雾液滴进行了采样,用显微镜及其 CCD 相机对雾滴样本进行了图像采集,用图像处理软件对采集的雾滴图像进行了处理与分析,测量并统计了 5966 个雾滴,得到了雾滴尺寸的频谱分布和累积分布以及雾滴平均直径和特征直径,将测量结果与相位多普勒粒子分析仪(PDPA)的测量结果进行了比较。结果表明,机器视觉方法可测量的最小雾滴直径约  $4.39 \mu\text{m}$ ;机器视觉测量结果与 PDPA 测量结果相当接近,两种方法测得的细水雾液滴平均直径和特征直径的相对误差均在 5% 以内,雾滴尺寸均匀度指数的相对误差为 0.27%。

**关键词** 图像处理; 雾滴尺寸; 机器视觉; 图像采集

中图分类号 TP302 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092910.2842

## Measurement and Analysis of Water Mist Droplet Size Based on Machine Vision

Yuan Jiangtao<sup>1,2</sup> Yang Li<sup>1</sup> Wang Xiaochuan<sup>1</sup> Zhang Jian<sup>1</sup> Jin Renxi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)  
<sup>2</sup> Naval Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266071, China

**Abstract** In order to meeting the demand of measuring the water mist droplet size with high accuracy and low cost, the machine vision measuring technique for the droplet size was studied in depth. The water mist droplets were sampled in self-building high pressure spraying system and droplets collecting device, the photos of the droplets sample were taken by the microscope and its CCD camera, the droplets sample photos were processed and analysed using the image processing software. The total number of the measured and counted droplets was 5966. The droplet size spectral, cumulative distribution and the droplet mean and indicated diameter were obtained. The machine vision measuring results were compared with the PDPA measuring results. Results indicate that the minimum droplet which the machine vision technique can be used to measure is  $4.39 \mu\text{m}$ , and the machine vision results are close to the PDPA measuring results. The relative errors of the water mist droplet mean and indicated diameter are less than 5%, and that of the droplet size dispersion coefficient is 0.27%.

**Key words** image processing; droplet size; machine vision; image collecting

## 1 引言

喷雾技术在工业、农业、消防、医学以及日常生活中都有广泛的应用<sup>[1]</sup>。雾滴尺寸及其分布是衡量喷雾质量的重要参数之一。雾滴尺寸测量方法按照测量原理可分为 3 类,即机械测量方法、电子测量方

法以及光学测量方法。机械测量方法简单,设备成本投入少,但费时费力,测量精度不高;电子测量方法准确迅速,但仅限于测量运动速度小于  $10 \text{ m/s}$  的雾滴;以相位多普勒粒子分析仪(PDPA)和马尔文粒子分析仪为代表的的光学测量方法近年来发展较

收稿日期: 2008-12-11; 收到修改稿日期: 2009-02-16

基金项目: 国防预研基金(101050202)资助课题。

作者简介: 袁江涛(1980—),男,博士研究生,主要从事传热传质与热流体学及其应用等方面的研究。

E-mail: 405jtyuan@163.com

导师简介: 杨立(1962—),博士,教授,主要从事传热传质与热流体学及其应用、热物理测量和舰船尾流特征等方面的研究。E-mail: lyang39@hotmail.com

快,它们通过对雾滴的非接触测量,可以快捷地检测大量雾滴信息,测量精度高,但这些仪器结构复杂,影响测量结果的因素较多,且价格昂贵,现阶段尚难以普及<sup>[1~3]</sup>。

机器视觉(Machine vision)作为光电技术应用的一个特定领域,目前已广泛应用于电子、汽车、医疗、印刷、科研等众多领域。近年来 CCD 图像传感器的快速开发,成为推动机器视觉迅速发展的重要因素<sup>[4]</sup>。图像采集是机器视觉的基础<sup>[5]</sup>,图像处理与分析是机器视觉的核心<sup>[6]</sup>。国外自 20 世纪 70 年代就开始了微粒图像自动分析系统的研制,C. S. Ow 等<sup>[7]</sup>1981 年发表了他们的研究成果;Derksen 等<sup>[8]</sup>于 1995 年研制了一种测量液滴尺寸的计算机视觉系统。国内毛靖儒等<sup>[9]</sup>1983 年开始合作开展雾滴尺寸自动测量系统的研究;2000 年,郑加强<sup>[10]</sup>对雾滴尺寸的计算机视觉测量方法进行了探索;之后,相关研究不断见诸报道<sup>[11~13]</sup>。本文在前人研究基础上对细水雾液滴尺寸测量的机器视觉方法进一步进行了探讨与分析,简化了雾滴采样方法,增大了雾滴样本容量,测量结果精度较高。

## 2 雾滴图像采集

图 1 所示为自行建立的高压喷雾系统和雾滴采集装置。高压喷雾系统以水作为被雾化介质,主要由水箱、闸阀、过滤器、电机、柱塞泵、调压阀、回流阀、压力表和喷嘴组成。通过调整调压阀和回流阀获得所需的雾化压力 3.5 MPa。为安装方便,各管路与喷嘴间均采用高压橡胶软管连接。考虑到管路中存在的压力损失,压力表安装在喷嘴入口处,测量雾化压力。实验所用 LNN0.60 喷嘴由美国 Spraying 喷雾公司生产,孔径 0.41 mm,属单路压力微细雾化喷嘴,喷雾形状呈均匀的空心锥形。为防止柱塞泵损坏和喷嘴堵塞,分别在柱塞泵和喷嘴前安装了初、次级过滤器。雾滴采集装置主要由采样盘、采样板和升降平台组成。采样盘为直径 75 mm 的培养皿,内装有约 2 mm 深的硅油。硅油无色无味,不溶于水,常温下密度为  $975 \text{ kg/m}^3$ ,略小于水。采样盘采集的雾滴能长时间悬浮于硅油中并保持球形,没有扩散变形与蒸发。文献<sup>[10,11]</sup>采用的是传统的雾滴采样方法,即先将雾滴收集在一个油质基板上,再用轻油涂盖,这样可使雾滴保持球形,并避免因蒸发使其直径减小。相比而言,本文直接用硅油收集细水雾液滴的采样方法更为简便。采样板为  $600 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  的矩形有机玻璃板,厚

2 mm,中间有  $15 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  的矩形开口,其作用类似于照相机的快门,让进入采样盘的雾滴控制在一定范围内。雾滴采样高度为 200 mm,通过升降平台调整。采样板的移动速度取决于采样高度和雾化压力等因素。雾滴采样结束后,关闭喷雾系统,移开采样板,将采样盘用盖子盖好,然后迅速将采样盘移至显微镜下进行图像采集。

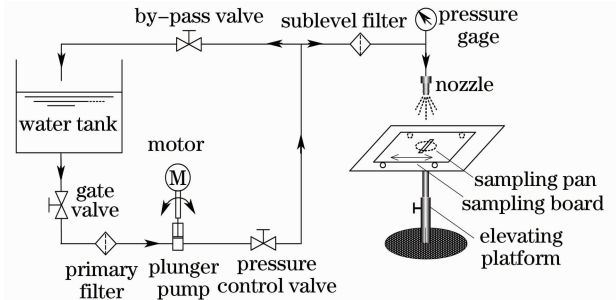


图 1 高压喷雾系统与雾滴采集装置

Fig. 1 High-pressure spraying system and droplets collecting device

当被测雾滴尺寸较大时,雾滴图像可用 CCD 摄像机直接采集,文献<sup>[12]</sup>即采用 CCD 摄像机直接采集了直径为  $837 \sim 987 \mu\text{m}$  的雾滴图像。本文被测雾滴直径在  $100 \mu\text{m}$  以下,属细水雾范畴,图像采集必须借助于显微镜。图 2 所示为显微图像采集与测量系统。硬件部分主要由显微镜、CCD 相机、图像采集卡和计算机组成,软件部分包括图像采集软件和图像处理与分析软件。本实验采用德国 LEICA DM2500M 显微镜,本身配备有 CCD 相机,显微观察的同时,具有 CCD 图像采集功能。

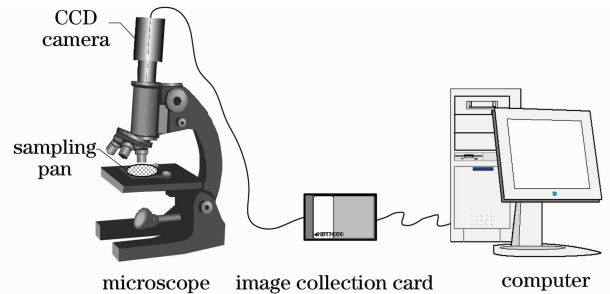


图 2 显微图像采集与测量系统

Fig. 2 Microscopic image collecting and measuring system

实验时选择放大倍数为  $50 \times$ ,由 CCD 相机采集的雾滴图像为 24 bit RGB 真彩色位图,分辨率为  $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$ ,JPG 格式。为了保证雾滴统计测量精度,被测雾滴数量应足够多,每次采样雾滴样本容量应不少于 5500 个<sup>[1,14]</sup>。本实验在每个采样盘内均匀选择 30 个采样点进行显微图像采集,通过

USB 接口直接将雾滴图像传输到计算机,以备处理。

### 3 雾滴图像处理

雾滴图像采集后,在 Matlab 平台上编制图像处理程序自动完成雾滴数字图像处理与分析<sup>[15]</sup>。为方便后续处理,首先用 Matlab 图像处理工具箱提供的 `imresize` 函数对 CCD 相机采集的雾滴图像缩小至 0.3 倍,并用 `rgb2gray` 函数将其转换为 8 bit 的灰度图像,如图 3(a)所示。由于雾滴灰度图像的灰度值在整个灰度范围 $[0, 255]$ 内仅占有部分分布,导致图像偏暗,对比度较差,雾滴目标不易辨认,用 `imadjust` 函数并调用 `stretchlim` 函数的返回值将雾滴图像的灰度值拉伸到 $[0, 255]$ 整个灰度范围,增强灰度图像的对比度,处理效果如图 3(b)。调用基于 Otsu 算法的 `graythresh` 函数自动确定雾滴图像的灰度阈值,应用 `im2bw` 函数进行二值化处理,结果如图 3(c)所示,得到的二值图是一个只有 0(黑)和 1(白)组成的  $460 \times 614$  阶二维矩阵。二值图中,一般用 0 值表示背景,1 值表示前景(目标),为方便后续处理,用函数 `imcomplement` 进行黑白反向处理,结果如图 3(d)所示。由图 3(a)~(d)可见,由于雾

滴顶部对光线的反射作用,导致图像上雾滴顶部颜色较浅,进行黑白反向处理后,雾滴顶部区域也被处理成黑色背景,用 `imfill` 函数进行填充处理,将连接的背景像素 0 改为前景像素 1,直达到对象的边界,处理结果如图 3(e)所示,白色雾滴目标在黑色背景中清晰可辨。CCD 图像采集和处理过程中不可避免地受到各种噪声的干扰,能否有效地抑制这些噪声是提高测量精度的关键<sup>[16]</sup>。采用中值滤波方法将干扰噪声去除,用 `medfilt2` 函数实现,处理时采用  $3 \times 3$  模板,结果如图 3(f)所示。为统计准确,雾滴图像边缘上的残缺雾滴应予以清除,用 `imclearborder` 函数实现,处理效果如图 3(g)所示。在雾滴图像二值图上,每个雾滴用一个白色连通区域表示,为求得连通区域的个数,对图像进行标记处理,即对属于同一个像素连通区域的所有像素分配一个相同且独一无二的编号,用 `bwlabel` 函数实现,并通过 `label2rgb` 函数将各个不同编号的连通区域进行彩色显示,如图 3(h)所示。最后,用 `regionprops` 函数,提取和度量雾滴图像上每个标记连通区域的面积,通过换算,即可获得每个雾滴的粒径大小。

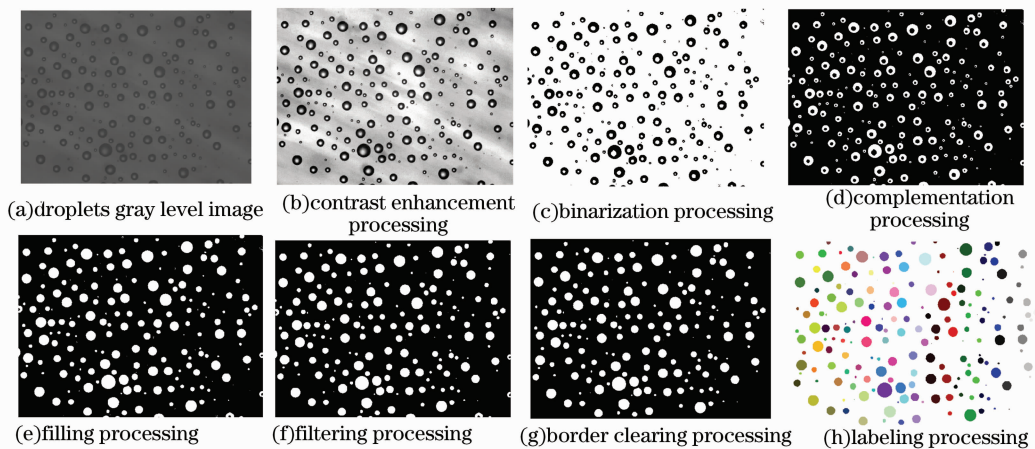


图 3 雾滴图像处理

Fig. 3 Droplets image processing

由图 3 可见,本实验采集的雾滴样本质量较高,雾滴数量合适,且没有雾滴粘连。对于粘连雾滴,在图像处理时固然可以采用相关算法(如分水岭算法)进行分割<sup>[13,15]</sup>,但分割后的雾滴难以保证其完整性,给雾滴统计与测量带来一定误差。为消除这种误差,本实验选用的均为无粘连雾滴样本。实验发现,只要采样板移动速度合适,采集高质量无粘连的雾滴样本并非难事。在图 3 所示的雾滴图像上共统计和测量了 189 个雾滴。对其他 29 幅雾滴图像进

行相同的处理与分析,总共获得 5966 个雾滴的尺寸信息。雾滴样本的处理、统计和测量时间总共不过 2 min。现有文献<sup>[10~13]</sup>的样本容量一般不超过 1500 个雾滴,本文雾滴样本容量远大于其他文献。

### 4 显微标尺标定

对数字图像而言,其基本组成单位是像素。因此,上述雾滴尺寸统计结果的单位是像素。这是个大小不确定的概念,同一个像素在不同数字图像中

代表的实际尺寸一般是不同的。为了获得雾滴的实际尺寸,必须建立雾滴图像像素与实际尺寸之间的对应关系。为此,本实验对显微镜自带的显微标尺进行了标定。

像素点的形状一般并非正方形,即水平和垂直方向的长度不等<sup>[17]</sup>。本实验分别对横向和纵向放置的标尺进行了图像采集,如图 4(a),(b)所示。由 CCD 相机采集的标尺图像较为模糊,为减小标定误差,对标尺图像依次进行对比度调整、中值滤波、二值化与黑白反向处理,最终结果分别如图 4(c),(d)所示,处理过的标尺图像刻度清晰可辨。实验发现,在放大倍数为 50×时,无论标尺横向放置还是纵向放置,总长为 1 mm 的标尺上 100 个刻度均占有 257 个像素,则像素点水平和垂直方向的标定系数均为  $\delta=1000 \mu\text{m}/257 \text{ pixel}=3.8911 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。

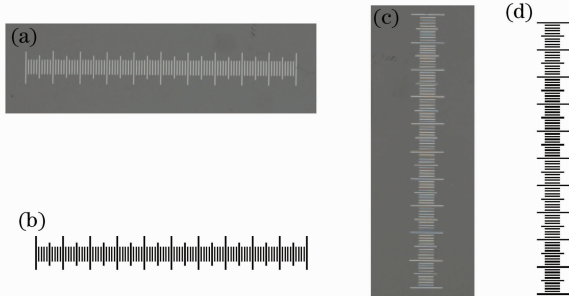


图 4 显微标尺图像处理。(a)横向标尺原图;(b)横向标尺二值图;(c)纵向标尺原图;(d)纵向标尺二值图

Fig. 4 Image processing of micro-scale. (a) original image of horizontal scale; (b) binary image of horizontal scale; (c) original image of vertical scale; (d) binary image of vertical scale

## 5 雾滴尺寸分析

由于雾滴能在硅油中长期悬浮保持球形,因此认为采集到的雾滴图像为圆形,结合标定系数  $\delta$ ,可用以下公式计算雾滴直径

$$d_p = 2\delta \sqrt{A/\pi}, \quad (1)$$

式中  $d_p$  为雾滴直径,  $A$  为雾滴面积。由于数字图像上可识别的最小单位面积为 1 个像素,用(1)式可计算得本实验可测量的最小雾滴直径为  $4.39 \mu\text{m}$ 。

图 5 所示为统计出的雾滴尺寸频谱分布,表示不同粒径雾滴数量的变化曲线。图 6 所示为雾滴尺寸的累积分布,表示小于给定尺寸雾滴的相对数量、相对体积(相对质量)。图 6 同时给出了 LNN0.6 喷嘴的 PDPA 测量结果,数据由 Spraying 喷雾公司提供。可见,本文测量结果与 PDPA 测量结果非常

接近,说明机器视觉方法测量雾滴尺寸不但成本低、易操作、速度快,而且精度高。

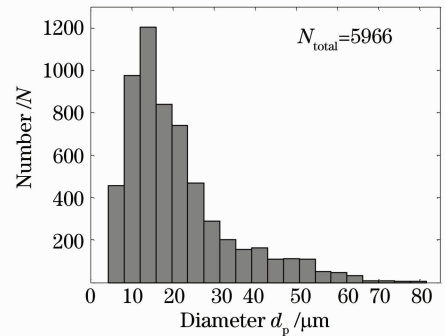


图 5 雾滴尺寸频谱分布

Fig. 5 Droplet size spectral distribution

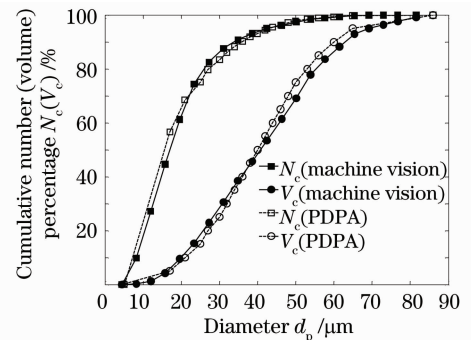


图 6 雾滴尺寸累积分布

Fig. 6 Droplet size cumulative distribution

雾滴尺寸也常利用有限次的雾滴尺寸测量数据通过拟合关联起来,用数学模型表示。最常用的雾化液滴尺寸数学模型为 Rosin-Rammler 模型,其表达式为<sup>[1]</sup>

$$V_c = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_p}{d_{p0.632}}\right)^n\right], \quad (2)$$

式中  $V_c$  为粒径在  $d_p$  以下的所有雾滴累积体积(质量)百分比,  $d_p$  为与  $V_c$  相应的雾滴粒径,  $d_{p0.632}$  为雾滴特征直径,  $n$  为均匀度指数,值越大,表示雾滴粒径分布越均匀,一般为 2~4。由(2)式,当  $d_p = d_{p0.632}$  时,  $V_c = 1 - 1/e = 0.632$ ,即取对应 63.2% 累积体积的粒径为雾滴特征直径  $d_{p0.632}$ 。由图 6 查得,机器视觉方法测得  $d_{p0.632} = 47.17 \mu\text{m}$ ,与 PDPA 测得的  $45.28 \mu\text{m}$  相差 4.17%。

将(2)式两边取对数,可得

$$n = \frac{\ln \ln(1/1 - V_c)}{\ln(d_p/d_{p0.632})}. \quad (3)$$

将雾滴尺寸测量结果按照(3)式所示的对数关系作图,并拟合成一条直线,如图 7 所示,直线的斜率即为均匀度指数  $n$ 。机器视觉方法测得  $n = 2.637$ ,与相位多普勒粒子分析仪(PDPA)测得的 2.63 相差 0.27%。

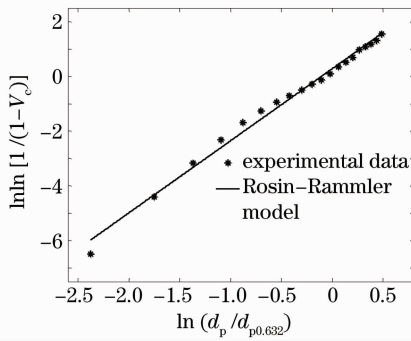


图 7 对数坐标下的雾滴尺寸分布

Fig. 7 Droplet size distribution in logarithmic coordinate

机器视觉方法测量数据与 Rosin-Rammler 分布模型如图 8 所示。可见,本实验测得的雾滴尺寸分布可由如下 Rosin-Rammler 模型表示:

$$V_c = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_p}{47.17}\right)^{2.637}\right]. \quad (4)$$

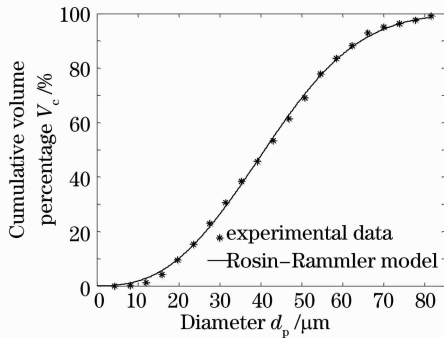


图 8 实验结果与 Rosin-Rammler 模型比较

Fig. 8 Comparison of the experimental data and the Rosin-Rammler model

由图 5 所示的雾滴尺寸频谱分布可见,经喷嘴雾化后的雾滴群体,粒径尺寸大小不一,最大粒径  $81.67 \mu\text{m}$ ,最小粒径  $4.39 \mu\text{m}$ ,相差近 20 倍。为研究和应用方便,人们提出了多种雾滴平均直径和特征直径的定义方法<sup>[1]</sup>,其中工程中最为常用的是平均直径  $d_{p32}$  与特征直径  $d_{p0.1}$  (小于该直径的所有雾滴体积占全部雾滴体积的 10%) 和  $d_{p0.5}$  (小于该直径的所有雾滴体积占全部雾滴体积的 50%)。当雾滴尺寸分布用 Rosin-Rammler 模型表示时,常用平均直径和特征直径可按下式计算<sup>[1,14]</sup>:

$$\begin{cases} d_{p0.1} = 0.1054^{\frac{1}{n}} d_{p0.632} \\ d_{p32} = \left[\Gamma\left(1 - \frac{1}{n}\right)\right]^{-1} d_{p0.632} \\ d_{p0.5} = 0.693^{\frac{1}{n}} d_{p0.632} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\Gamma$  为伽马函数。计算结果如表 1 所示。可见,机器视觉方法测得的雾滴平均直径和特征直径与 PDPA 测量结果的相对误差均在 5% 以内。

表 1 雾滴平均直径和特征直径

Table 1 Droplet mean diameter and indicated diameter

Diameter	$d_{p0.632}$	$d_{p32}$	$d_{p0.1}$	$d_{p0.5}$
PDPA result/ $\mu\text{m}$	45.28	34.00	21.00	40.00
Machine vision result/ $\mu\text{m}$	47.17	32.68	20.10	41.04
Relative error/%	4.17	3.88	4.29	2.61

## 6 结 论

本文采用机器视觉技术,简化了传统的雾滴采样方法,增大了雾滴样本容量,对细水雾液滴尺寸进行了测量与分析,得到如下主要结论:

1) 机器视觉方法可测量的最小雾滴直径约  $4.39 \mu\text{m}$ ,适用于细水雾液滴的尺寸测量与分析。

2) 细水雾液滴尺寸的机器视觉测量结果与 PDPA 测量结果十分接近,2 种方法测得的雾滴平均直径和特征直径的相对误差均在 5% 以内,雾滴尺寸均匀度指数的相对误差为 0.27%。这表明本文的雾滴采样方法有效,雾滴尺寸测量结果精度较高。

3) 雾滴尺寸的机器视觉测量方法成本低、易操作、速度快、精度高。在价格昂贵的 PDPA 和马尔文粒子分析仪尚不能普及的条件下,该方法为科研与工程中雾滴尺寸测量与分析提供了一种新的手段。

致谢: 感谢理学院陈德斌老师,陈珊老师和曹国良博士在显微镜观测方面提供的帮助与指导!

## 参 考 文 献

- Cao Jianming. *Spraying* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. 1~2, 83, 99~103 108, 116~156  
曹建明. 喷雾学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 1~2, 83, 99~103 108, 116~156
- Hou Lingyun, Hou Xiaochun. *Nozzle Technical Manual* [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2002. 73~76  
侯凌云, 侯晓春. 喷嘴技术手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2002. 73~76
- L. G. Dodge. Comparison of performance of droplet sizing instruments [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(7): 1328~1341
- Lei Wenhua. General situation of machine vision [J]. *J. Appl. Optics*, 2006, **27**(5): 467~470  
雷文华. 机器视觉发展概述 [J]. 应用光学, 2006, **27**(5): 467~470
- Zeng Xiangzhong. Image collecting technique-the base of machine vision [J]. *J. Appl. Opt.*, 2006, **27**(6): 602~606  
曾祥忠. 图像采集技术-机器视觉的基础 [J]. 应用光学, 2006, **27**(6): 602~606
- Zhu Hong. Image processing and analyzing-the core of machine vision [J]. *J. Appl. Opt.*, 2007, **28**(1): 121~124  
朱虹. 图像处理与分析-机器视觉的核心 [J]. 应用光学, 2007, **28**(1): 121~124
- C. S. Ow, R. I. Crane. Pattern recognition procedures for a television-minicomputer spray droplet sizing system [J]. *J.*

- Institute of Energy*, 1981, **54**(420): 119~123
- 8 R. C. Derksen, C. Jiang. Automated detection of fluorescent spray deposits with a computer vision system [J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, **38**(6): 1647~1653
- 9 Mao Jingru, Shi Honghui, Wang Biyu *et al.*. Measurement of droplet size in steam-orgas-liquid two phase flow [J]. *Turbine Technology*, 1990, **32**(3): 49~55  
毛靖儒, 施红辉, 王璧玉 等. 汽(气)液两相流中雾滴尺寸的测量 [J]. *汽轮机技术*, 1990, **32**(3): 49~55
- 10 Zheng Jiaqiang. Droplet sizing technique based on computer-vision [J]. *J. Nanjing Forestry University*, 2000, **24**(6): 47~50  
郑加强. 基于计算机视觉的雾滴尺寸测量技术 [J]. *南京林业大学学报*, 2000, **24**(6): 47~50
- 11 Chen Yimin, Zhang Xingxiong, He Jincheng *et al.*. Sprayed droplet sampling and data gathering [J]. *J. Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2006, **35**(4): 445~448  
陈益民, 张性雄, 何金成 等. 微雾滴取样与数据采集方法 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2006, **35**(4): 445~448
- 12 Shi Chunjian, Qiu Baijing, Tang Bomin *et al.*. Analysis of droplet size distribution and movement based on high speed image processing [J]. *Transactions of the CSAM*, 2006, **37**(5): 63~66  
史春建, 邱白晶, 汤伯敏 等. 基于高速图像的雾滴尺寸分布统计与运动分析 [J]. *农业机械学报*, 2006, **37**(5): 63~66
- 13 Liang Ping. *Research of Droplet Size Measurement System Based on Computer Vision* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008  
梁萍. 基于计算机视觉的雾滴尺寸参数检测系统研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2008
- 14 Liu Zichao, Zhao Yunhui. *Laser Measurement Principle of Liquid Droplet and Particle* [M]. Beijing: Space and Aeronautics Press, 1988, **4**: 24~35  
刘子超, 赵云惠. 液雾及颗粒的激光测量原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1988, **4**: 24~35
- 15 Wang Ailing, Ye Mingsheng, Deng Qiuxiang. *MATLAB R2007 Image Processing Technique and Application* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008  
王爱玲, 叶明生, 邓秋香. MATLAB R2007 图像处理技术与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008
- 16 Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104  
丁晓华, 李由, 于起峰 等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 99~104
- 17 Chen Ken, Yang Rener. Area calculation for binary image with non-square pixels [J]. *J. Ningbo University(NSEE)*, 2006, **19**(2): 141~145  
陈 恩, 杨任尔. 非正方形像素之二值图形的面积计算 [J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2006, **19**(2): 141~145