文章编号 1674-2915(2013)03-0408-07

基于数字粒子图像测速的水雾粒径测量算法及实验

杜永成,杨 立*,刘 天
(海军工程大学 船舶与动力学院,湖北 武汉 430033)

摘要:针对利用传统数字粒子图像测速(DPIV)法测量水雾粒径时粒子影像拉长对测试结果的影响,提出了基于DPIV建立的改进图像法(IIM)。设计了水雾粒径测量试验系统,对细水雾进行实时测试,并对比了采用本文算法与直接等效法测试水雾粒径子半径的差异。结果表明:采用本文的IIM得到的测试结果更为准确。通过最小二乘法对粒径分布进行拟合,发现对数正态分布函数和威布尔函数都可以较好地描述粒径分布。

关 键 词:细水雾;粒径测量;数字粒子图像测速;粒径分布
中图分类号:TH821; TK421.43　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20130603.0408

Algorithm and experiment on droplet sizing based on DPIV

DU Yong-cheng, YANG Li*, LIU Tian
(*College of Naval Architecture and Power*, *Naval University of Engineering*, *Wuhan* 430033, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *lyang*39@ *hotmail. com*

Abstract: When traditional Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) is used to measure water spray particles, the elongated image from a common CCD will effect the measuring results. To eliminate the effect of the elongated image of water spray particles, an Improved Image Method (IIM) was built based on DPIV. An experiment system was designed to make a real-time test for the water spray, by which the difference of measured particle sizes obtained by the improved image method and the direct equal method was contrasted. The results show that the algorithm used in this paper is more available to measure the radius of water spray particle. The radius distribution curve is fitted by least square method, which shows that both the lognormal function and Weibull function can describe the radius distribution well.

Key words: water spray; droplet sizing; Digital Particle Image Velocimetry (DPIV); radius distribution

收稿日期:2012-12-21;**修订日期**:2013-01-23
基金项目:国防预研基金资助项目(No. 1010502020202)

1　引　言

细水雾在灭火降燥、除尘增湿等诸多领域有着重要应用,此外,其在舰艇红外隐身领域的应用也引起人们高度重视,因此,获取准确、实时的粒径谱和数密度对细水雾的应用研究非常重要[1]。在微粒粒径测试方面,各领域专家已经发展建立了很多测试手段,但多数都是针对固体颗粒,包括沉降法、筛分法、电感应法等[2-3],这些方法的测试精度普遍不高,并且很难应用在气液两相流的测试中。机器视觉法[4]可以实现对液态颗粒的测量,但主要针对的是单颗粒,如果对全场测试则效率太低不宜应用。近年来发展起来的光散射反演法、超声衰减法、激光全息法等无论是在测试范围还是测试精度都有了大幅提高,但光散射法涉及到复杂的反演计算,受限于算法;激光全息法仪器过于复杂,操作不便,成本昂贵[5]。相位多普勒粒子分析仪(Phase Doppler Particle Analyzer,简记 PDPA)是两相流粒度测试中应用较多的方法,但该技术只能实现同一时刻的单点测量[4,6],同时,也存在着设备昂贵的问题。由于计算机图像处理技术的飞速发展,近年来数字粒子图像测速(Digital Particle Image Velocimetry,简记 DPIV)技术引起了粒度测试研究者的广泛重视。

DPIV 是上世纪末及本世纪初发展成熟的一项跨学科流场诊断技术,它分别应用和发挥了激光技术、图像和信息处理技术、计算机技术和近代光学技术的最新成果[7-9]。DPIV 在流场测速方面已发展了很多成熟算法,在粒径测量方面也有部分研究。如文献[4,6,10]都通过图像的前期处理后将单次曝光的粒子像点等效成圆形粒子像,将像素数转化成实际尺寸,使得粒径的测试得到简化。这种方法(本文称之为直接图像法 Direct Equal Method,简记 DEM)存在的主要问题是对 CCD 要求较高。因为普通的 CCD 在成像时为保证采光量不能开启大的快门速度,而粒子的高速运动会使其在焦平面上的成像正比于曝光时间,从而使粒子影像并非圆形或近似圆形而是被拉长。在这种情况下,直接通过粒子图像的像素信息计算粒子的投影面积就会产生误差。本文通过对图像数字矩阵中单个粒子外接矩阵的提取分析,建立了一种改进的图像法(Improved Image Method,简记 IIM)来解决这个问题,使得较普通的家庭用 CCD 就可以适用于 DPIV 技术,实现高速运动雾滴粒径的测量。

2　基本原理

采用 DPIV 法测雾滴粒径的仪器设备与测雾滴速度的设备是相同的,都是以激光片光照射雾场,采用高分辨率的 CCD 摄像头在大光圈系数下拍摄得到雾滴图像,再以 MATLAB 为平台,通过数字图像处理技术获取雾滴信息。不同的是前者通过粒子识别分析提取粒径信息,而后者通过互相关算法等分析短暂间隔内的两幅图像,获取水雾的速度场。两者在图像处理方面是迥然不同的,本文重点考虑的是使用简单设备,如家庭用单反相机,作为图像采集设备时所产生的问题。

2.1　粒径公式推导

图像区域实际尺寸可根据变焦换算获得:设焦距为 f,物距为 L,图像的垂直高度为 h,水平长度为 l,则拍摄区域的水平长度 $\mathrm{d}x$ 和垂直高度 $\mathrm{d}y$ 可表示为:

$$\mathrm{d}x = \frac{lL}{f},\ \mathrm{d}y = \frac{hL}{f}. \tag{1}$$

每幅图像的像素数为:$M = M_l \times M_h$,每个像素的尺寸为:

$$\mathrm{pels}_h = \frac{\mathrm{d}y}{M_h},\ \mathrm{pels}_l = \frac{\mathrm{d}x}{M_l}, \tag{2}$$

式中,pels_h、pels_l 分别表示单个像素的垂直高度和水平宽度;M_h、M_l 分别表示每幅图像垂直高度的像素数和水平宽度的像素数;单个雾粒子面积 S_{particle} 可由单个粒子像素数 M_{particle} 表示:

$$S_{\mathrm{particle}} = M_{\mathrm{particle}} \cdot \mathrm{pels}_l \cdot \mathrm{pels}_h, \tag{3}$$

则雾滴半径的公式为:

$$r = \sqrt{\frac{S_{\mathrm{particle}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{M_{\mathrm{particle}} lhD^2}{\pi M_l M_h f^2}}, \tag{4}$$

式中,l、h、M_l、M_h、f、D 都是已知或可通过简单计算得到的值,只有 M_{particle} 需要通过复杂的图像处理得到。将 $\sqrt{\frac{lhD^2}{\pi M_l M_h f^2}}$ 记为 σ,因此式(4)又可写为:

$$r = \sigma \sqrt{M_{\text{particle}}} . \tag{5}$$

由上可知,精确计算粒径的关键是单个粒子的等效像素提取。

2.2 图像处理

用 rgb2gray 函数将 RGB 图像转化为灰度图像,采用空间域卷积滤波法对图像平滑去噪,通过平方运算增大亮度对比度,再通过基于 Otsu 算法的自适应函数 graythresh 将图像进行阈值分割,转化成 0 和 1 的二值图像。

图像转化成二值图像后重点在形态学处理。首先通过 spur 运算去掉“1”值区的“小短枝”,这种小短枝主要是由粒子散射光及阈值选取导致的,而非粒子的有效面积像素,应清除;然后通过 clean 运算清除孤立亮点(中间为 1,四周全为 0),以及与之相对应的 fill 运算,填充孤立像素点(中间为 0,四周全为 1);再通过结构元素 ones(3)用 dilate 和 erode 运算对二值图像进行膨胀和腐蚀运算,主要是消除粒子粘连和重叠的影响;最后通过连通对象标注函数 bwlabel 对图像进行标注。

压力式喷嘴形成的水雾有着较快的运动速度,初始速度可达 20 ~ 30 m/s,运动后期速度也达 0.5 ~2 m/s。设水雾粒子的直径分布在 50 μm 左右,曝光时间为 1/10 000 s,即使对 0.5 ~2 m/s 运动的雾滴成像,平行于 CCD 焦平面运动的粒子也将产生 50 ~200 μm 的位移,相当于粒子的投影面积被增大了 1 ~4 倍。虽然有激光片光来增强 CCD 感光,但若增大快门,对于普通家庭用 CCD 还是会因曝光时间过短而导致曝光不足,成像不清。因此,当采用普通 CCD 成像时,在水雾图像上有着从圆点到短线的各种不同形状的粒子形态。圆点主要是垂直于 CCD 镜头平面运动的粒子,而成短线的粒子则是与 CCD 镜头平面成小于 90°角运动的粒子,如图 1 所示。

(a) 呈“短线”的粒子图像
(a) Image of short-linear particle

(b) 呈近似圆形的粒子图像
(b) Image of approximate circle particle

图 1 圆形粒子不同的成像形态

Fig. 1 Different imaging modalities of spherical particles

为了消除影像拉长在粒径计算中的误差,需要对每个粒子进行微处理。基本思想是:每幅水雾数字图像中单个粒子都是“0”和“1”组成的,由于每个粒子矩阵的“1”值都是斜对角的,可通过粒子矩阵与其转置矩阵的叠加来获取“1”值的叠加区域,叠加区域为正四边形,由此可转变为粒子半径。基本方法为:(1)建成单元数组 $C\{1,\text{NUM}\}$,NUM 为图像矩阵中的粒子数;(2)由于图像矩阵已进行连通对象标注,因此可通过图像矩阵的扫描获取每个连通区域的边界值矩阵 $\boldsymbol{M}_{\text{v}}$[above,low,left,right],这样可通过循环控制语句将每个连通域赋给 $C\{1,\text{NUM}\}$;(3)通过 Size( )函数检查每个单元的大小,并记录成 $\boldsymbol{M}_{\text{s}}[\text{row}_{\text{i}}, \text{column}_{\text{i}}]$。

如果 $\text{row}_i + \text{column}_i$ 为偶数:

若 $\text{row}_i > \text{column}_i$,则删除 $1:\dfrac{\text{row}_i - \text{column}_i}{2}$ 行和 $\dfrac{\text{row}_i + \text{column}_i}{2}:\text{row}_i$ 行;

若 $\text{column}_i > \text{row}_i$,则删除 $1:\dfrac{\text{column}_i - \text{row}_i}{2}$ 列和 $\dfrac{\text{row}_i + \text{column}_i}{2}:\text{column}_i$ 列;

如果 $\text{row}_i + \text{column}_i$ 为奇数:

若 $\text{row}_i > \text{column}_i$,则将该单元扩展成 $\text{row}_i + 1$ 行,扩展元素为 0,

再删除 $1:\dfrac{\text{row}_i + 1 - \text{column}_i}{2}$ 行和 $\dfrac{\text{row}_i + \text{column}_i + 1}{2}:\text{row}_i + 1$ 行;

若 $\text{column}_i > \text{row}_i$,则将该单元扩展成 $\text{column}_i + 1$ 列,扩展元素为 0,

再删除 $1:\dfrac{\text{column}_i + 1 - \text{row}_i}{2}$ 列和 $\dfrac{\text{row}_i + \text{column}_i + 1}{2}:\text{column}_i + 1$ 列;

(4)这样每个单元都成了 $n_i \times n_i$ 的矩阵,再将每个单元做转置运算生成 $D\{1,\text{NUM}\}$,将 C 与 D 做加

法运算生成 $E\{1,NUM\}$;(5)再通过统计 E 中每个单元中‘2’值元素的个数便计算出了粒子的有效像素。将有效像素代入式(5)即可计算出每个水雾粒子的粒径。

2.3　算法验证

由于 DEM 对标准圆形粒子图像计算分析结果是正确的,所以可作为检验 IIM 准确性的参考标准。本文采用文献[10]的方法,分别用 DEM 和 IIM 对人为设计的完全由圆形粒子组成的标准图像进行粒径分析,两种方法所得结果基本相同,由此说明本算法是可靠的。

3　实验与数据处理

3.1　实验系统

本实验采用家庭用 NikonD60 相机,总有效像素为 1 020 万,微距镜头 $f = 105$ mm,影像尺寸为 3 872 pixel × 2 592 pixel,感光度 ISO 为 100 ~ 1 600时以 1 eV 为增量微调;采用电子控制纵走式焦平面快门,曝光时间为 1/4000 ~30 s 时,可作 1/3 eV 微调。为满足曝光时间的要求,实验中采用最大光圈 5.6,用激光片光增强感光。实验系统如图 2 所示。图 3 为通过此系统实拍的水雾图像。

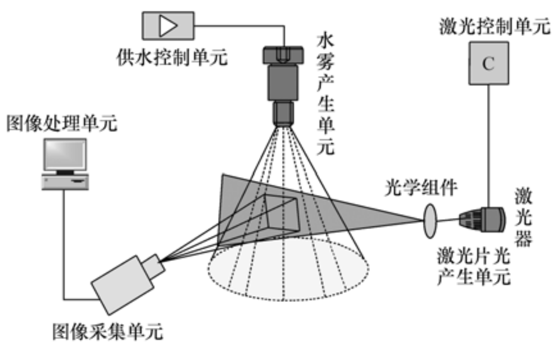


图 2　实验系统

Fig. 2　Experiment system

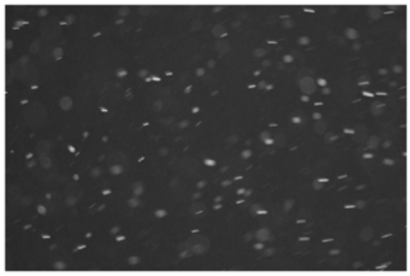


图 3　实时图像

Fig. 3　Real-time image

3.2　试验方法、数据处理与分析

对单个喷嘴分别施加 0.5、0.6、0.7、0.8 MPa 的压力使其产生不同流速的水雾,曝光时间固定为 1/1 000 s,对每种工况下统计 400 个粒子,测试在不同流速下采用 IIM 与 DEM 的差异;将喷雾压力定为 0.5 MPa,改变曝光时间分别为1/1 000、1/1 200、1/1 300、1/1 400 s,同样对每种工况采集 400 个粒子,测试在曝光时间加长的情况下 IIM 与 DEM 的差异。建立粒子半径谱,通过最小二乘法分析其最佳的概率分布。

表 1 为不同实验条件下 IIM 和 DEM 两种方法所得结果的比较。由表 1 可见,在固定曝光时间,仅使喷雾压力增大的前提下,利用 DEM 测量的算术平均粒径 R_0 没有一定的变化规律。这主要是因为压力增大的情况下喷雾粒径变小,但由于粒子速度增大,而曝光时间不变,粒子在焦平面上的成像被进一步拉大,两者产生的综合作用使其变化规律不明显;而采用 IIM 测试的结果显示,

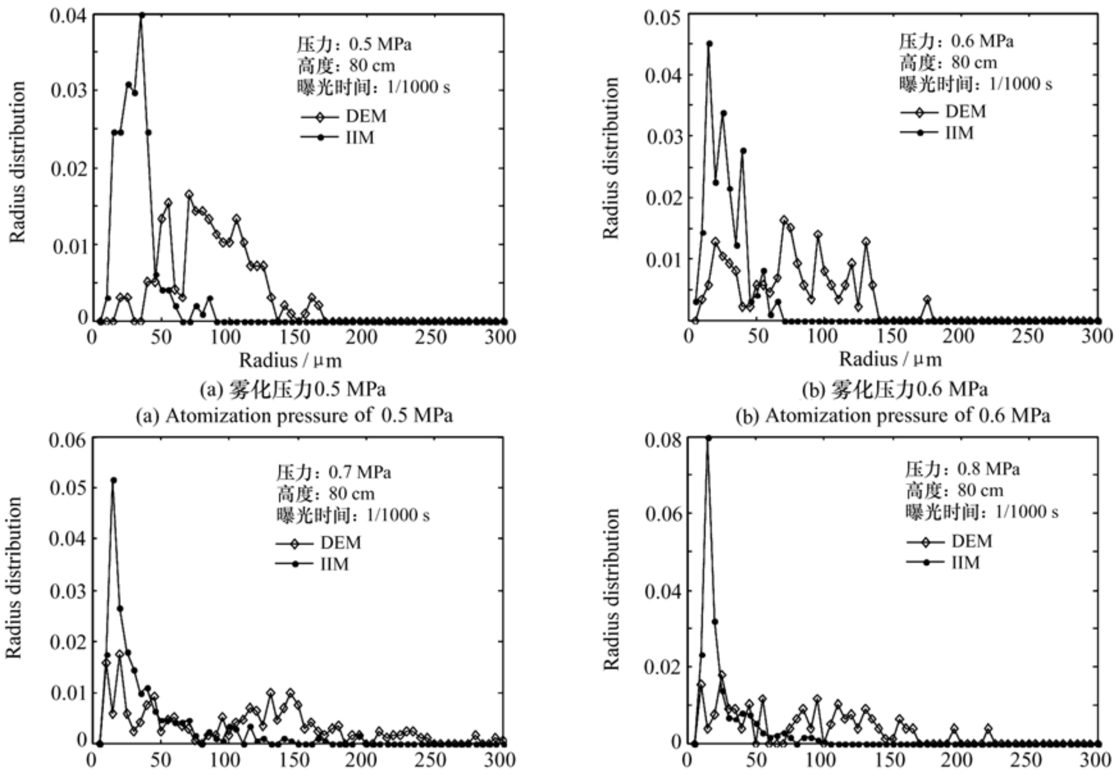
表 1　直接等效法与本文算法的比较

Tab. 1　Comparison between directly equal method and proposed algorithm in this paper

压力/MPa	R_0(曝光时间 1/1 000 s)		曝光时间/s	R_0(喷雾压力 0.5 MPa)	
	DEM/μm	IIM/μm		DEM/μm	IIM/μm
0.5	105.6	35.4	1/1 000	106.7	35.4
0.6	99.7	26.2	1/1 200	98.5	36.2
0.7	104.8	25.4	1/1 300	93.2	35.8
0.8	107.4	20.9	1/1 400	90.1	34.9

在固定曝光时间的前提下，喷雾粒径随喷雾压力的增大而减小。而在喷雾压力为定值的前提下，随着曝光时间的变小，采用 DEM 计算时，R_0 呈减小的趋势，而 IIM 的结果基本不变。由于曝光时间变短，使得雾滴在焦平面上的成像变短，因此采用 DEM 的计算结果会变小，这样便产生了很大的误差。大量统计结果表明，采用 DEM 会根据曝光时间和喷雾速度的不同产生 0.5 ~3 倍的误差，因此应予改进算法或改变试验条件，尽量使得曝光时间缩短。总体而言，在该实验条件下，本文的改进算法是切实可行的。

图 4 中(a)(b)(c)(d)分别是在曝光时间为



(a) 雾化压力0.5 MPa
(a) Atomization pressure of 0.5 MPa

(b) 雾化压力0.6 MPa
(b) Atomization pressure of 0.6 MPa

(c) 雾化压力0.7 MPa
(c) Atomization pressure of 0.7 MPa

(d) 雾化压力0.8 MPa
(d) Atomization pressure of 0.8 MPa

图 4 采用 DEM 和 IIM 处理的粒径分布对比

Fig. 4 Radius distribution contrast between DEM and IIM

1/1 000 s，喷雾压力为 0.5、0.6、0.7、0.8 MPa 的计算结果对比。由图 4 可见，采用 DEM 的测量结果不能体现出粒径的分布规律；而采用 IIM 的处理结果则可较为清晰的体现粒径分布规律。

将试验所得粒子半径分别进行对数正态分布概率密度函数和威布尔函数拟合(图 5)，从图中可见，细水雾的粒径分布对威布尔函数和对数正态分布函数都符合较好。当采用对数正态分布时，可直接获取细水雾的算术平均粒径，因此工程应用中可根据需要采用不同的拟合函数。

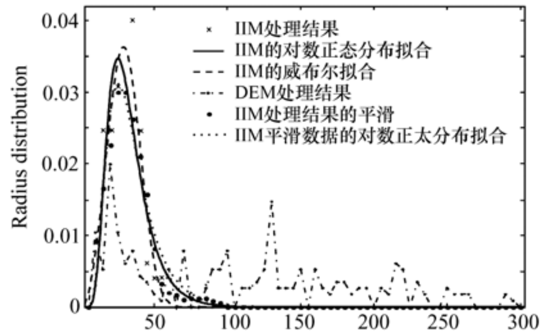


图 5 粒径分布拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of radius distribution

4 结　论

本文针对在利用普通 CCD 进行 DPIV 水雾粒径测试时,由于曝光时间长造成的粒子成像拉长现象,设计了纠正算法,进行了实验研究,结论如下:

基于数字粒子图像处理的水雾测试改进算法消除了因粒子速度及 CCD 成像曝光时间而造成的测试误差,并通过标准粒径对比分析证明了该算法可靠准确;设计了水雾粒径测量实验系统,通过实时测量与对比,证明改进图像法测试结果更为准确。采用最小二乘法,对水雾的粒径分布进行了几种经验函数的拟合,发现对数正态分布函数和威布尔函数都可以较好地描述粒径分布,工程应用中可根据需要选择不同的分布函数。

参考文献:

[1] SUFHEER K P,PANDA R K. Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles[J]. *Agricultural Water Management*,2000,45(2):159-167.

[2] 李文凯,吴玉新,黄志民,等.激光粒度分析和筛分法测粒径分布的比较[J].中国粉体技术,2007,13(5):10-14.
LI W K,WU Y X,HUANG ZH M,*et. al.*. Measurement results comparison between laser particle analyzer and sieving method in particle size distribution[J]. *China Powder Science and Technology*,2007,13(5):10-14.(in Chinese)

[3] 杨粉荣,文洪杰,钟勤,等.几种力度测试方法的比较[J].物理实验,2005,23(5):36-39.
YANG F R,WEN H J,ZHONG Q,*et. al.*. Comparison of several measurement methods of particle size[J]. *Physics Examination and Testing*,2005,23(5):36-39.(in Chinese)

[4] 卢平,章名耀,陆勇,等.利用 PIV 测量水煤雾化粒径的试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2003,33(4):446-449.
LU P,ZHANG M Y,LU Y,*et. al.*. Experimental study on particle size measurement of atomizing coal-water paste with PIV technology[J]. *J. Southeast University*(Natural Science Edition),2003,33(4):446-449.(in Chinese)

[5] 祁力钧,胡开群,莽璐,等.基于图像处理的雾滴检测技术[J].农业机械学报,2009,40:48-51.
QI L J,HU K Q,MANG L,*et. al.*. Droplet detection based on image processing[J]. *T. Chinese Society Agricultural Machinery*,2009,40:48-51.(in Chinese)

[6] 黄成杰,吴志军,李治龙,等.粒子图像速度粒度同场测量基础与实验验证[J].吉林大学学报(工学版),2010,40(4):1106-1111.
HUANG CH J,WU ZH J,LI ZH L,*et. al.*. Fundamentals of particle velocity and size measurement in same field and its experimental validation[J]. *J. Jilin University*(Engineering and Technology Edition),2010,40(4):1106-1111.(in Chinese)

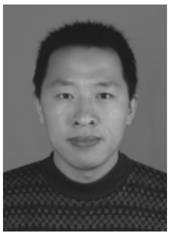
[7] WILLERT C E,GHARIBM M. Digital particle image velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*,1991,10:181-193.

[8] 唐朝晖,刘金平,桂卫华,等.基于数字图像处理的浮选泡沫速度特征提取及分析[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(6):1618-1623.
TANG ZH H,LIU J P,GUI W H,*et al.*. Froth bubbles speed characteristic extraction and analysis based on digital image processing[J]. *J. Central South University*(Science and Technology),2009,40(6):1618-1623.(in Chinese)

[9] 刘文洪,万甜,程文娟,等.基于图像二值化处理的气泡羽流不稳定结构分析[J].水利学报,2009,40(11):1369-1373.
LIU W H,WAN T,CHENG W J,*et. al.*. Analysis on steady structure of bubble plume in the basis of image binarization[J]. *J. Hydraulic Eng.*,2009,40(11):1369-1373.(in Chinese)

[10] 王喜世,伍小平,廖光煊,等.扩展的 DPIV 方法及其在雾滴粒径测量中的应用 [J].科学通报,2002,47(4):260-264.
WANG X SH,WU X P,LIAO G X,*et al.*. Extended DPIV method and the application on the spray droplets sizing[J]. *Chinese Sci. Bull.*,2002,47(4):260-264.(in Chinese)

作者简介:



杜永成(1985—),男,山东济南人,博士研究生,2008年、2010年于海军工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事红外光谱隐身方面的研究。E-mail:dy-cheng@yeah.net

刘　天(1982—),男,湖北武汉人,博士研究生,2003年、2007年于海军工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事传热、传质及热流体学与应用方面的研究。E-mail:skyliu_54@163.com

杨　立(1962—),男,重庆北碚人,博士,教授,博士生导师,1982年于北京工业学院获得学士学位,1989年、1995年于海军工程学院获得硕士、博士学位,主要从事红外测温、目标红外特征与隐身、红外检测诊断、传热传质等方面的研究。E-mail:lyang39@hotmail.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4;国内外公开发行,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

★ 荷兰Scopus数据库
★ 美国《乌利希国际期刊指南》
★ 美国《化学文献》
★ 波兰《哥白尼索引》
★ 俄罗斯《文摘杂志》
★ 中国光学学会会刊
★ 中国科技核心期刊数据库
★ 中国期刊全文数据库
★ 万方数字化期刊全文数据库
★ 中国科技期刊数据库
★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
编辑出版:《中国光学》编辑部
投稿网址:http://chineseoptics.net.cn
邮件地址:chineseoptics@ciomp.ac.cn; zggxcn@126.com
联系电话:0431-86176852; 0431-84627061　　传　真:0431-84627061
编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)