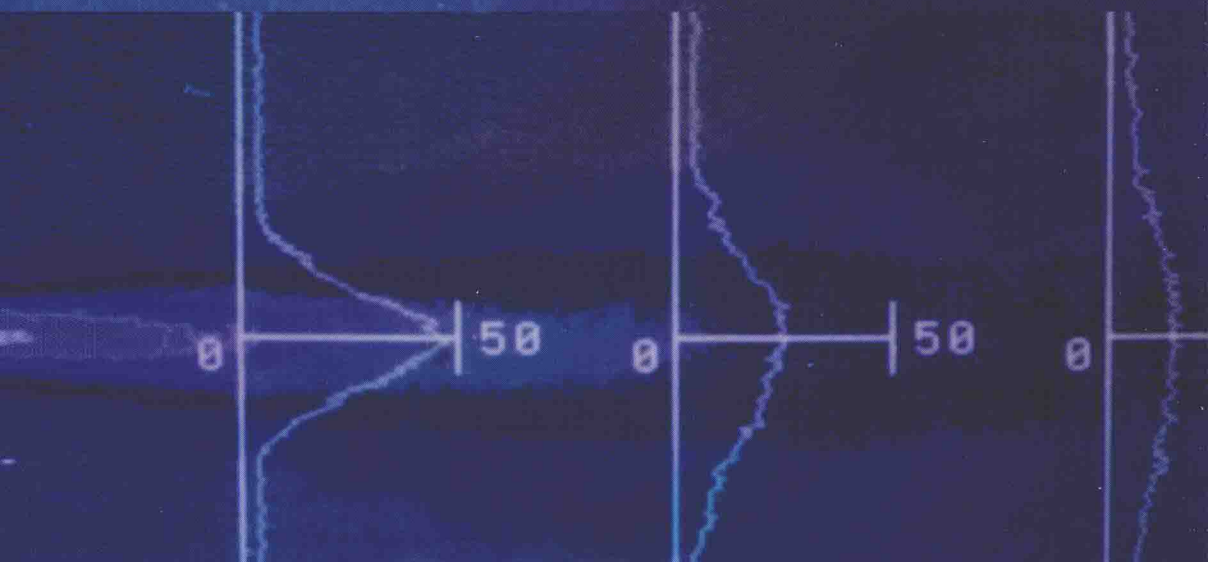


激光诱导荧光技术

——在水体标量场测量中的应用

Laser-Induced Fluorescence Technique :
Its Application of Aqueous Scalar Field Measurements

黄真理 著



科学出版社

激光诱导荧光技术

——在水体标量场测量中的应用

**Laser-Induced Fluorescence Technique:
Its Application of Aqueous Scalar Field Measurements**

黄真理 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是关于平面激光诱导荧光(planar laser-induced fluorescence, PLIF)技术方面的学术专著。本书介绍了 PLIF 技术测量流动参量的基本原理,建立了一套 PLIF 技术测量浓度场系统,对测量系统的影响因素进行了全面分析,提出了二维数字校正理论和方法。在此基础上,本书将 PLIF 技术测量浓度场的理论和方法应用于自由紊动射流测量、紊动射流的分维测量和工程应用领域常见的横流环境中的射流测量,介绍了作者取得的一系列初步研究成果,同时,对 PLIF 技术在火焰燃烧、高速气动力学、传热传质、环境水力学等领域的应用和 LIF 技术测量设备的发展进行了述评和展望,提出了 3DLIF 技术测量三维浓度场和温度场的关键技术。最后,介绍了研发 3DLIF 技术测量三维浓度场和温度场设备的技术方案。

本书可供高等院校、科研单位从事流体力学(水力学)研究和教学的科技人员,火电和核电温排水、环境污染模拟的专业人员,以及火焰燃烧、过程工程和化学工程领域对流动测量感兴趣的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光诱导荧光技术:在水体标量场测量中的应用/黄真理著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-039725-6

I. ①激… II. ①黄… III. ①激光检测-研究 IV. ①TN247

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 022368 号

责任编辑:刘信力/责任校对:李 影
责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 3 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张:15

字数:277 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



作者简介



黄真理, 1966 年 10 月生, 贵州省平坝县人。1993 年毕业于清华大学水利系, 获工学博士学位。1993 年以来, 在国务院三峡工程建设委员会办公室从事技术与管理工作。2002 年 2 月至 2012 年 8 月, 任国务院三峡工程建设委员会办公室水库管理司副司长, 研究员。2012 年 8 月至今, 任国家能源局、水利部国家水电可持续发展研究中心(中国水利水电科学研究院水电可持续发展研究中心)主任, 教授级高级工程师。先后在国内学术刊物和会议发表论文 60 余篇, 著作和技术报告 10 余部。作为主要完成人, 曾获 2005 年国家科技进步奖二等奖(三峡水库淹没区固体废弃物污染治理专项技术研究), 1996 年国家教委科技进步奖三等奖(感潮河流混合输移特性与应用), 1998 年教育部科技进步奖二等奖(数字图像和 PLIF 技术及其测量射流浓度场的研究), 2005 年教育部提名国家科技进步奖一等奖(三峡水库水污染控制研究), 2008 年国家广播电影电视总局科技创新奖一等奖(和三峡呼吸与共——三峡工程生态与环境监测系统)。

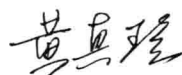
前 言

平面激光诱导荧光 (planar laser-induced fluorescence, PLIF) 技术属于激光光谱学诊断技术, 是一种新的流动显示和流动测量方法, 是非介入式的、能实时获得二维甚至三维空间分布信息的实验方法, 不仅可以定性揭示流动的内部结构, 而且与图像处理技术结合起来, 可以进行浓度场、温度场、压力场以及速度场的定量测量。对解决当前火电和核电工程中的温排水测量和水利工程中的模拟污染物测量, 对开展湍流基础研究和流体力学 (水力学) 教学演示具有重要价值。同时, 在火焰燃烧、过程工程和化学工程领域也得到广泛应用。

本书共七章, 第 1 章介绍激光诱导荧光技术 (LIF) 测量流动参量的基本原理。第 2 章介绍了作者建立的 PLIF 技术测量浓度场系统, 对测量系统的影响因素进行了全面分析, 提出了二维数字校正理论和方法。第 3 章 ~ 第 5 章介绍了 PLIF 技术在自由紊动射流、横流环境中的紊动射流以及湍流机理方面的应用, 以及作者取得的一系列初步研究成果。第 6 章介绍了 PLIF 技术的现状和发展, 综述了在火焰燃烧、高速气动力学、传热传质、环境水力学等领域的应用和 LIF 技术测量设备的发展, 提出了 3DLIF 技术测量三维浓度场和温度场的关键技术。最后, 第 7 章介绍了研发 3DLIF 技术测量三维浓度场和温度场设备的技术方案。

本书是关于 PLIF 技术方面的学术专著, 源于作者在清华大学水利系完成的博士学位论文。2012 年 10 月份开始, 作者与中国科学院光电研究院和北京尚水信息技术股份有限公司合作, 准备国家重大仪器设备专项项目建议书。中国水利水电科学研究院水力学所、北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室、清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室、重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心等四家单位作为应用单位参与了项目的设计。第 7 章的内容源于该项目建议书, 是大家合作的结晶, 特别是周维虎博士、毕勇博士、曲兆松博士、李杰先生, 贡献甚大。本书还得到了中国水利水电科学研究院彭期冬博士、曾利博士和北京大学研究生王平同学的帮助, 在此表示感谢。

本书不足和错误之处在所难免, 敬请读者批评指正。



2013 年 11 月 30 日

符 号 表

符号	意 义
a	射流扩展系数
A	吸光度
b	荧光强度在 x 方向分布半宽
b_e	射流断面特征厚度
c	射流扩展率
C	浓度
C_0	喷口浓度
C_D	绕流阻力系数
d	直径
d_0	射流喷嘴直径
D	分子扩散系数, 分维数
D_T	拓扑维数
e	沿浓度梯度方向的单位方向矢量
E_0	喷口无量纲射流能量通量
E_k	灰度能谱
f	背景噪音
F	荧光强度 (灰度)
F_0	$y = 0$ 时的荧光光强
$\bar{F}$	时均灰度
F'_n	脉动灰度
F_d	Froude 数
H	水深
H_0	综合荧光参数 (一维), 相机到参考 (基准) 平面的距离
H_m	综合荧光参数 (二维)
I_0	入射光强度
k	径向畸变
l	透光长度
L	射流长度, 海岸线长度
$M \times N$	CCD/CMOS 相机的分辨率
M_D	D 维测度
n	孔数, 扫描断面数
N	码数

p	切向畸变
P	功率
Q	流量
Q_0	射流喷口单宽流量
R	流速比
Re	雷诺数
s	光程
S	孔距
S_a	吸光截面积
S_c	斯密特数
T	温度
T_v	黏性时间扩散尺度
T_D	标量 (浓度) 时间扩散尺度
T_δ	平均剪切时间尺度
u	速度
u'	喷嘴脉动速度
u_0	喷嘴速度
v	横流平均速度
v_s	水面横流速度
X_0	参考 (基准) 平面 X 方向测量范围
Y_0	参考 (基准) 平面 Y 方向测量范围
X_n	n 断面 X 方向测量范围
Y_n	n 断面 Y 方向测量范围
y	激光通过的液池厚度
y_0	片光光源到实验槽的距离
δ_x	非线性畸变值的 X 轴分量
δ_y	非线性畸变值的 Y 轴分量
Δh	隆起势能高度, 扫描断面的间距
ΔX_0	像素在 X 方向实际尺寸
ΔY_0	像素在 Y 方向实际尺寸
Δy	薄层厚度
Z_e	射流起始段末端位置
Z_k	浓度能谱
Z_s	射流弯曲段末端坐标
α	荧光强度沿 x 方向扩展率
γ	分维几何因子
δ	平均剪切空间尺度
ε	吸光系数, 码尺长度

ε_d	数字校正吸光系数
η	Kolmogorov 尺度
λ	波长
λ_d	最大耗散长度
λ_D	标量 (浓度) 空间扩散尺度
λ_g	耗散长度尺度
λ_v	黏性空间扩散尺度
Λ	射流最大积分尺度
ρ	密度
τ	时间
Φ	荧光效率
下标	
1	轴对称圆形射流
2	二维平面射流
rms	均方根
abs	吸收
em	发射
f	纵向
g	横向
m	轴线
max	最大
i	数字图像 x 方向像素坐标
j	数字图像 y 方向像素坐标
n	第 n 帧图像

目 录

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 荧光现象	2
1.2 LIF 技术测量浓度场和温度场原理	5
1.2.1 LIF 技术测量浓度场原理	5
1.2.2 LIF 技术测量温度场原理	7
1.3 LIF 技术初期应用	8
参考文献	11
第 2 章 PLIF 技术测量浓度场系统	14
2.1 激光器的选择	14
2.2 荧光物质的选择及其光谱分析	16
2.2.1 荧光物质的选择	16
2.2.2 荧光素钠的激发和发射光谱分析	17
2.2.3 荧光素钠的紫外分析	19
2.2.4 截止滤光片的选择及其透光分析	20
2.3 PLIF 技术的光学、图像采集和图像处理系统	22
2.3.1 光学系统	22
2.3.2 图像采集系统	24
2.3.3 图像处理系统	24
2.4 荧光强度的影响因素分析	26
2.4.1 浓度对荧光强度的影响	26
2.4.2 激光功率对荧光强度的影响	27
2.4.3 温度对荧光强度的影响	28
2.4.4 pH 对荧光强度的影响	29
2.4.5 截止滤光片对荧光强度的影响	29

2.5 二维数字校正理论和方法	30
2.5.1 二维荧光强度分布	30
2.5.2 参数 H_m 和 f 的确定	32
2.5.3 参数 ε 和 α 的确定	32
2.5.4 二维数字校正方法	34
参考文献	35
第 3 章 PLIF 技术测量自由紊动射流	36
3.1 射流时均浓度和瞬时浓度	37
3.2 射流脉动浓度和能谱	39
3.3 射流浓度分布特征	41
3.4 获得高质量 PLIF 图像的要点	43
参考文献	44
第 4 章 PLIF 技术测量横流中的紊动射流	45
4.1 横流中垂向纯射流的流动特征	45
4.1.1 静止水域中“浅水”概念及隆起高度的计算	45
4.1.2 有横流时流动转变条件的确定	50
4.1.3 有横流时的“浅水”概念	54
4.1.4 小结	55
4.2 PLIF 试验和测量装置	55
4.2.1 水槽和模拟污染物排放系统	55
4.2.2 PLIF 系统的布置	57
4.3 污染源浓度的选择	58
4.4 测量工况的基本参数及浓度测量结果	58
4.4.1 工况 I	59
4.4.2 工况 II	64
4.4.3 工况 III	67
4.4.4 工况 IV	67
4.4.5 工况 V	69
4.5 浓度分布特征分析	75
4.5.1 时均浓度与瞬时浓度的比较	75

4.5.2 马蹄形结构、分叉现象和尾涡	75
4.5.3 单孔射流边界和中心线	76
4.5.4 单孔射流轴线	78
4.6 小结	80
参考文献	80
第 5 章 PLIF 技术在湍流机理研究的应用	83
5.1 引言	83
5.1.1 分形与分维概念	84
5.1.2 分形理论的意义及其在流体力学中的应用	87
5.2 分维测量方法及测量软件的检验	92
5.2.1 分维测量方法	92
5.2.2 测量软件的检验	94
5.2.3 分维测量的不确定性问题	96
5.3 紊动射流的分维测量及分析	97
5.3.1 射流分维尺度的上、下临界点	99
5.3.2 射流分维 D 沿程的变化	100
5.3.3 射流分维 D 随 C/C_0 的变化	100
5.3.4 完全发展湍流的分维	102
5.3.5 问题讨论	103
5.3.6 湍流分形特征的评价	105
5.4 小结和展望	106
参考文献	108
第 6 章 PLIF 技术的现状及展望	111
6.1 PLIF 技术的现状和发展	111
6.1.1 从 LIF 技术到 3DLIF 技术	111
6.1.2 传统激光器和片光源技术	112
6.1.3 片光源扫描方式	117
6.1.4 激光波长与荧光物质的匹配	118
6.1.5 PLIF 的校正技术	122

6.1.6	PLIF 技术测量速度场	122
6.2	PLIF 技术在流体测量中的广泛应用	125
6.2.1	火焰燃烧	125
6.2.2	高速气动力学	128
6.2.3	传热传质	129
6.2.4	环境水力学	130
6.3	PLIF 技术测量设备的现状	132
6.4	3DLIF 三维测量设备研发的重要性	134
6.4.1	3DLIF 技术对科学研究的重要性	135
6.4.2	对促进国家经济社会发展的作用	136
6.4.3	3DLIF 技术对工程建设的作用	137
6.5	3DLIF 三维测量设备研发的关键技术	138
6.5.1	总体设计与系统集成技术	138
6.5.2	大尺寸矩形均匀片光源技术	138
6.5.3	扫描运动平台设计和制造技术	140
6.5.4	图像同步高速采集与存储技术	141
6.5.5	标定和校正以及三维重构技术	142
6.6	与国外同类设备的比较	143
	参考文献	144
第 7 章	3DLIF 技术测量三维浓度场和温度场设备研发的技术方案	155
7.1	总体技术方案	155
7.1.1	总体框架	155
7.1.2	需求分析	157
7.1.3	技术路线	158
7.1.4	技术难点	159
7.1.5	3DLIF 技术测量浓度场 (温度场) 研发设备总体技术指标	160
7.2	激光器和片光源分系统	160
7.2.1	大尺寸矩形均匀片光源关键技术	160
7.2.2	大尺寸矩形均匀片光源解决方案	162

7.3 扫描运动平台分系统	166
7.3.1 片光源扫描平台	167
7.3.2 相机运动平台	169
7.4 图像采集和存储分系统	169
7.4.1 高速图像采集系统	169
7.4.2 高速图像存储系统	171
7.4.3 UPS 不间断电源	173
7.4.4 软件开发	173
7.5 同步控制分系统	173
7.6 计算机和图像处理软件分系统	180
7.6.1 系统检测和参数采集	180
7.6.2 图像采集	181
7.6.3 图像处理	183
7.6.4 三维浓度 (温度) 场重建	185
7.7 标定与校正分系统	193
7.7.1 标定 (校正) 装置	194
7.7.2 校正软件	197
7.8 系统集成	202
7.8.1 系统集成技术路线	202
7.8.2 单元集成	203
7.8.3 总体集成与调试	206
7.8.4 系统总体技术指标和各分系统主要技术指标	207
参考文献	209
索引	210
后记	215

CONTENTS

Symbols

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Fluorescence Phenomena	2
1.2	Theories of Concentration and Temperature Measurements Using LIF Technique	5
1.3	Early Applications of LIF Technique	8
	References	11
Chapter 2	Concentration Field Measurement Setup of PLIF Technique	14
2.1	Choice of Laser	14
2.2	Choice of Fluorescence Material and Its Spectrum	16
2.3	Optical, Image Capture and Processing Systems of PLIF Technique	22
2.4	Effects on Fluorescence Intensity of Fluorecein Sodium in Water	26
2.5	Two-dimensional Digital Calibration Theroy and Methodology	30
	References	35
Chapter 3	Free Turbulent Jet Measurements by using PLIF Technique	36
3.1	Mean and Instantaneous Concentrations for Turbulent Jets	37
3.2	RMS Concentration Fluctuations and Energy Spectrum	39
3.3	Concentration Distribution of Turbulent Jet	41
3.4	Outlines of Obtaining High-quality PLIF's Images	43
	References	44
Chapter 4	Concentration Field Measurements of Turbulent Jet in Crossflow	45

4.1	Flow Characteristics of Vertical Pure Jets in Crossflow	45
4.2	PLIF Experimental Setup	55
4.3	Choice of Initial Concentration of Fluorescent Dye	58
4.4	Elementary Parameters of Different Flow Conditions and Concentration Measurement Results	58
4.5	Spatial Concentration Distributions of Turbulent Jets	75
4.6	Conclusions	80
	References	80
Chapter 5	Application of PLIF Technique on Fractal Dimension Measurement of Turbulent Flow	83
5.1	Introduction	83
5.2	Verification of Fractal Dimension Methods and Softwares	92
5.3	Fractal Dimension Measurements for Turbulent Jets	97
5.4	Conclusions and Outlooks	106
	References	108
Chapter 6	State-of-the-Art and Future of PLIF Technique	111
6.1	Recent Status and Outlook for PLIF Technique	111
6.2	Widely Applications of PLIF Technique on Flow Measurement	125
6.3	State-of-the-Art of PLIF Apparatus	132
6.4	Significance of R & D for 3DLIF Apparatus	134
6.5	Key Technologies of R & D for 3DLIF Apparatus	138
6.6	Comparison of 3DLIF Apparatus with Similar Wares	143
	References	144
Chapter 7	Technical Solutions of Three Dimensional Measurement Apparatus by 3DLIF Technique	155
7.1	General Technical Scheme	155
7.2	Sub-system of Laser and Laser Sheet	160
7.3	Sub-system of Scanning/Moving Platforms	166
7.4	Sub-system of Image Acquisition and Storage	169

7.5	Sub-system of Synchronous Controller ·····	173
7.6	Sub-system of Computer and Image Processing Software ·····	180
7.7	Sub-system of Calibration and Correction ·····	193
7.8	Sub-system of System Intergration ·····	202
	References ·····	209
Index	·····	210
Afterword	·····	215

第1章 绪 论

在科学研究中,如果能够直观地对由某一物理过程产生的或与它相关联的图像进行观察研究,那么,对该物理现象的理解就会更为深入。流体力学、水力学的学科发展,得益于流动显示(观察)技术的进步。当我们考察一个流体力学过程,如流动的分离时,这一点更为明显。通过观察流动图像,人们可以得到流动整个发展过程的概念。为了辨认流体的运动,必须提供一套使流动可视化的技术,这种技术称为流动显示技术。在流体力学的发展过程中,层流和湍流概念的提出,激波现象、边界层、猝发现象以及湍流边界层中大涡结构的发现等,都借助于流动显示技术,它对了解流体力学问题起着十分重要的作用。然而,除了演示性外,随着计算机和图像处理技术的发展,许多流动显示技术更重要的作用是能够从所获得的流动图像推导出定量的数据,这种技术能够在流动不受干扰的情况下提供整个流动的定量信息。相反,单一的流动测量仪器,如某些压力、温度或电导探头以及LDV测速仪,只能提供流场中某一点的信息。另外,探头的存在对流动会产生某种程度的影响。流动显示技术的发展突飞猛进,方法多种多样,总结起来,大体上可分为三类^[1]:第一类包括在流动流体中添加外来可视物的所有方法,如在液体中加入染料、在空气加入烟和蒸汽、作用粒子或氢气泡示踪测量速度等;第二类为借助于流体密度变化的光学显示,如光偏转显示法、干涉法等;第三类为附加加热和能量的流动显示,是第一、二类方法的结合,如火花示踪技术、激光诱导荧光技术等。

激光诱导荧光(laser-induced fluorescence, LIF)技术是一种新的流动显示和流动测量方法,不仅可以定性揭示流动的内部结构,而且与图像处理技术结合起来,可以进行浓度场、温度场、压力场以及速度场的定量测量^[2-26]。该技术自20世纪70年代中期用于剪切层的混合流动显示开始发展起来,已经历了从气体到水体,从定性到定量,从线测量到面测量等发展过程,逐步得到改进和完善。例如,多种激光染料用于水体的流动显示,根据诱导荧光对酸度(pH)的敏感用于化学反应流动中进行显示,在超音速气体流动研究中加入碘蒸气或NO气体可提高流动显示的可视性等,结合激光片光技术的发展,已广泛应用于旋涡分离流、化学反应流、混合流和湍流基础研究中,有效地揭示了流动的三维结构。特别是80年代以来,由于光敏元件特别是高分辨率、高灵敏度的CCD(charge-coupled device)面阵摄像技术的异军突起和图像处理技术的飞速发展,使LIF技术能进行定量测量,并且