

清华大学学术专著

激光多普勒 测速技术及应用

沈 熊 编著



清华大学出版社



清华大学学术专著

激光多普勒 测速技术及应用

沈 熊 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是关于激光多普勒测速技术的专著,总结了激光测速技术发展和应用的成果,较为系统地描述了测速仪的基本原理、系统组成部件和各种光学配置以及信号处理的方法与特点,并介绍了大量复杂流动测量中成功应用的实例,充分反映了这项新技术的优越性和实用性。

本书兼有学术研究专著和技术参考书的特点,可供从事流动测量的技术人员、实验工作者和研究人员,包括高等院校有关专业的学生、研究生和教师学习参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

激光多普勒测速技术及应用/沈熊编著. —北京:清华大学出版社,2004

(清华大学学术专著)

ISBN 7-302-08017-8

I. 激… II. 沈… III. 激光多普勒技术 IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 006320 号

出 版 者:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

客户服务:010-62776969

组稿编辑:金文织 张秋玲

文稿编辑:张秋玲

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市印务有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:153×235 印张:22.5 插页:6 字数:383 千字

版 次:2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-08017-8/TN·173

印 数:1~2000

定 价:69.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

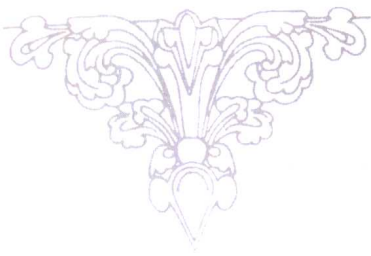


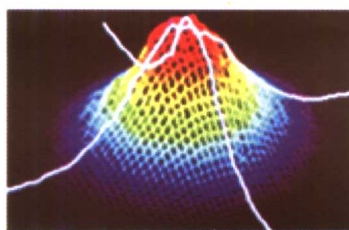
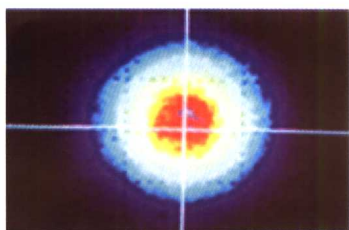
作者简介



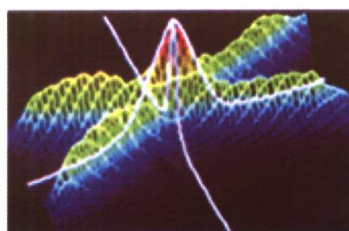
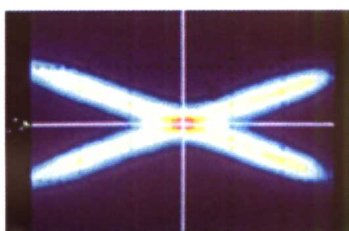
沈熊 1935年生，上海市人。1958年毕业于清华大学电机工程系工业企业电气化专业。1959—1999年在清华大学工程力学系任教，教授职称。现任《实验力学》、《流体力学实验与测量》编委。

主要业绩：从20世纪70年代起，先后研制成功我国第一台激光流速计、我国第一台频移型一维和二维激光测速仪及微机数据采集处理系统；发明专利有“SCD-2双差动声光频移二维激光多普勒测速仪”、“单色四光束频移三维激光测速仪”；先后获全国科学大会奖、宁夏自治区重大科技成果奖、国家仪器仪表工业总局重大科技成果奖、两项国家教委科技进步二等奖、国家发明四等奖以及清华大学校级奖励10多项；合著《流速测量技术》获全国优秀科技图书二等奖；译著有《激光多普勒测速技术的原理与实践》、《激光多普勒技术》、《激光技术在流体力学中的应用》；发表学术论文百余篇。在北京清华大学主办了三届流体动态测量与应用国际会议，促进了国际学术交流，并赢得了国际声誉；在清华大学率先开设“激光测速”课程和“激光测速”教学实验，历经20多年，培养研究生、本科生和进修人员近3000人，为在我国开拓和推广激光测速技术的研究与应用做出了贡献。

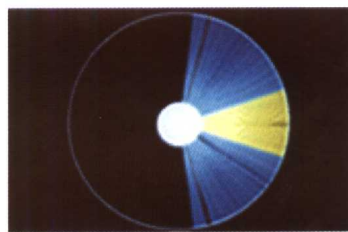
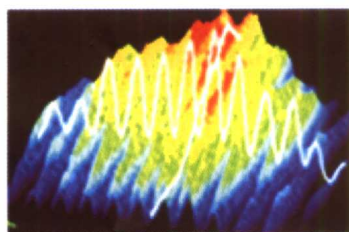




单模激光束光强分布

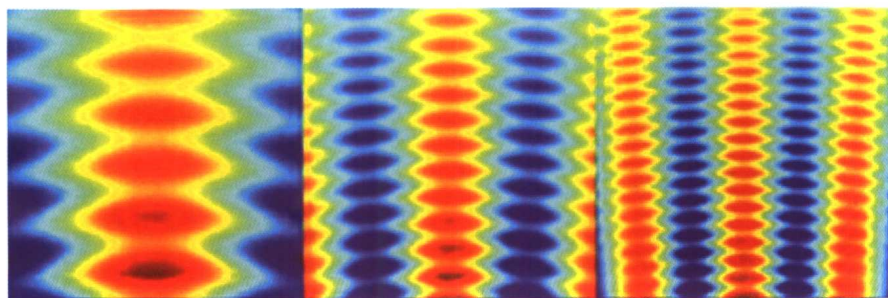


双光束控制体光强分布



控制体干涉条纹

相位-多普勒方向特性

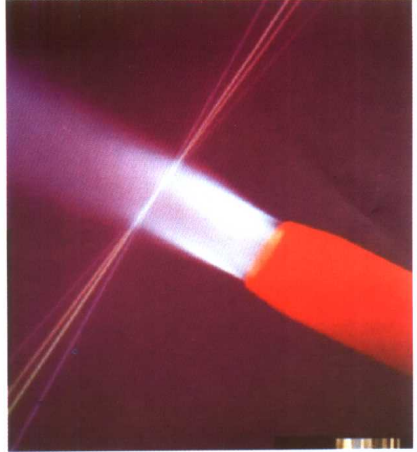


相位-多普勒空间干涉条纹

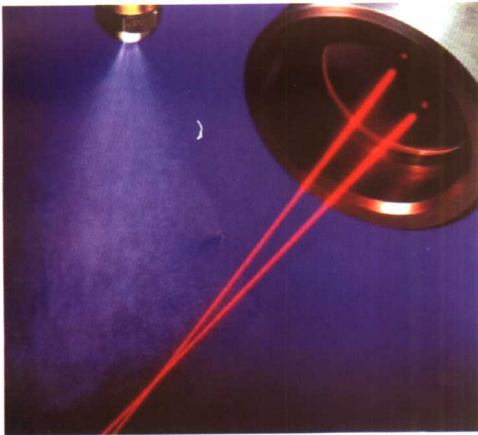
激光多普勒测速和粒径测量实例照片



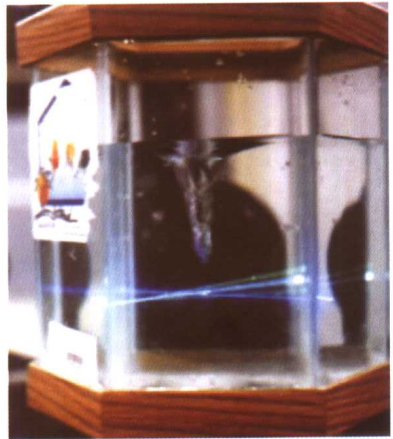
飞机模型



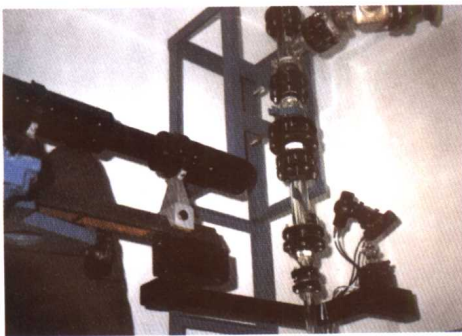
尾喷管火焰



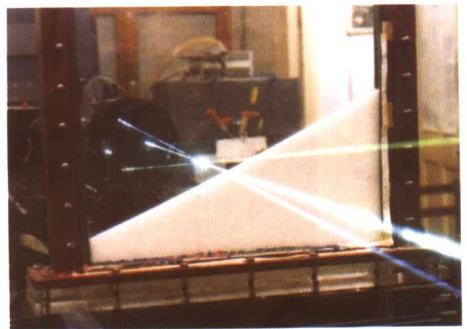
雾化喷嘴



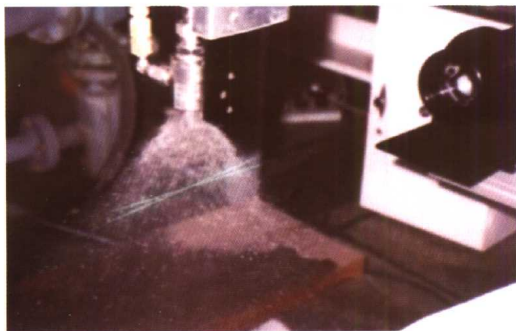
旋涡流场



腐蚀实验



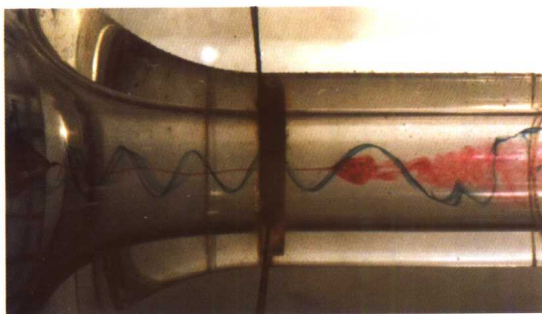
流化床模型



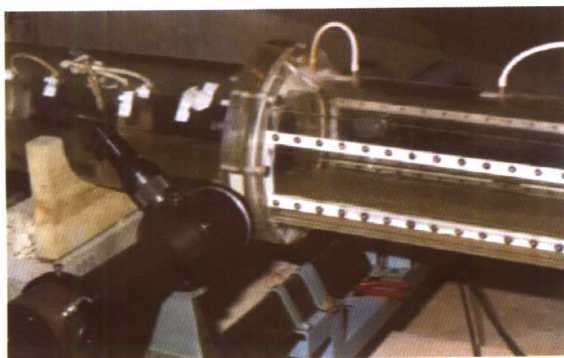
发动机喷嘴



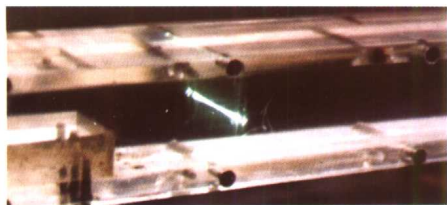
面具流场



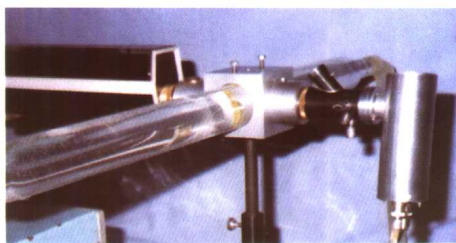
旋涡破裂



小浪底泄洪洞模型



突扩模型



流量计量



风洞校正



水坝模型



本科生实验

研究生实验



Abstract

This book is specialized in the laser Doppler velocimetry (LDV) and phase Doppler sizing anemometry (PDSA), summarized its development and applications in recent decades. The principles and characteristics of LDV/PDSA optics and signal processors are systematically described. A large number of examples for applying various systems to fluid flows is provided and proves the advantages and practicality of such new technique.

The main purpose of the book is to communicate the knowledge relevant to the measurements in research by laser Doppler method and provide a reference book to the readers, such as the technicians, experimental researchers and university students and teachers in related specialties.

前 言

自从 1964 年应用激光多普勒效应首次测得流体速度以来,已经历了将近 40 个年头。在这期间,激光测速技术经历了发生、发展和广泛应用的过程。作为一种崭新的流动测量技术,它的发展速度之快是很少见的,它对于流体力学实验研究的贡献可见诸于每年大量发表的论文成果中。当时还鲜为人知的激光测速仪现在已能在大多数高校和研究机构见到其身影。它的应用领域已遍及航空、航天、机械、能源、石油、动力、冶金、钢铁、水利、化工、轻工、环保、计量、医学等各部门,成为科研和新产品研发过程中的有效手段。随着我国经济和科技的快速发展,各种门类的高新工业制造业的蓬勃兴起,激光测速技术必将得到进一步的普及、应用和发展。

激光测速是一门涉及激光、光学、电子、信号处理、计算机和软件的光机电一体化新技术;同时,它又是与流体力学密切相关,应用性很强的实验测试技术。正是由于流体运动的形态十分复杂,传统的测试手段局限性很大,因而这一技术才获得了十分重要的发展原动力。为此,本书除了介绍激光测速系统各组成部件的原理和技术成果外,还用较大的篇幅介绍了在各种复杂流动状态下得到的实验结果,以便使读者对这一测量技术从原理到应用有比较完整和感性的认识。

本书的对象是从事流动测量的技术人员、实验工作者,高等院校有关专业的学生、研究生和教师。全书内容共分 7 章。第 1 章为概述,简要介绍激光测速技术的特点和发展史;第 2 章为激光测速光学系统,介绍激光测速的光学原理、各种布置形式和基本参数;第 3 章为激光测速信号处理,介绍多普勒信号的特性和各种信号处理方法;第 4 章为频移型激光测速系统,介绍流向判别原理和功能,以及多维激光测速仪的组成;第 5 章为激光测速的新进展,介绍光纤应用、激光测速仪小型化以及全场多普勒测速技术的进展;第 6 章为相位多普勒技术,介绍激光多普勒测速技术在粒径测量方面的重要扩展;第 7 章为激光测速技术的应用,介绍激光测速在各领域的应用实例,涉及高湍流、分离流、射流、旋流、涡流、面流、波流、两相流、混合流、燃烧、流速/流量标定以及固体运动速度测量等。

作为一部学术专著,本书主要总结了作者及有关同事和研究生们多年

来从事激光测速研究和应用的成果和经验。虽然本书也引用了部分国内外同行专家的研究成果,但因篇幅所限,本书的内容毕竟不能完全涵盖这一领域飞速发展的全貌。鉴于这方面的中文参考书目前国内已长期处于空白,作者期望本书的出版能为那些对激光测速技术感兴趣并需要应用此技术于流动测量的读者有所帮助,以解燃眉之急。书中内容如有片面和错误之处,敬请读者批评指正。

本书的出版得到了清华大学学术专著出版基金的资助;并得到了清华大学出版社金文织编审和张秋玲副教授的大力支持。感激之情,难以尽述。

谨以本书纪念激光多普勒测速技术诞生 40 周年!

沈 熊

2003 年 9 月于北京清华园

目 录

前言	3
1 概述	1
1.1 激光多普勒测速的特点	1
1.2 激光测速技术的发展概况	3
参考文献	6
2 激光多普勒测速原理与光学系统	7
2.1 激光多普勒效应	7
2.2 激光测速光学布置的基本模式	9
2.3 激光测速中的微粒光散射	13
2.4 激光测速的光路结构和基本参数	21
2.5 二维激光测速原理和光路	33
参考文献	36
3 激光测速的信号处理	37
3.1 激光多普勒信号的特性	37
3.2 频谱分析	54
3.3 频率跟踪解调	59
3.4 计数式信号处理	74
3.5 数字相关信号处理	91
3.6 快速傅里叶变换信号处理	99
3.7 信号与数据处理的智能化与软件功能	108
参考文献	111
4 频移激光测速系统	113
4.1 频移原理及其功能	113
4.2 光学频移的主要方法	119

4.3	频移量可变的激光测速系统·····	124
4.4	频移技术在多维测速系统中的应用·····	126
	参考文献·····	147
5	激光测速技术的新进展·····	149
5.1	光纤在激光测速中的应用·····	149
5.2	激光测速系统的小型化·····	157
5.3	多普勒全场测速技术·····	166
	参考文献·····	175
6	相位多普勒粒子测量技术·····	177
6.1	示踪粒子尺寸对流动测量的影响·····	177
6.2	相位多普勒方法的理论模型·····	183
6.3	相位多普勒系统的组成·····	193
6.4	光纤型相位多普勒系统及其应用·····	197
6.5	可同时测量粒子速度、直径与温度的彩虹相位多普勒系统·····	204
	参考文献·····	210
7	激光多普勒技术在复杂流动测量中的应用·····	212
7.1	非对称突扩管道中湍流分离流场·····	212
7.2	二维凸台分离流场的测量·····	218
7.3	孔板管流的三维湍流特性测量·····	221
7.4	多孔板管流的湍流特性·····	226
7.5	激光测速用于测量旋涡破裂流动·····	230
7.6	振动圆柱尾迹的 LDV 测量·····	235
7.7	湍流脉动的双点激光多普勒相关测量·····	238
7.8	自由面流消能的湍流特性测量·····	244
7.9	液-液旋流分离管内流场的激光诊断·····	251
7.10	用双镜头三维 LDV/PDPA 测量液流流动的方法·····	259
7.11	空气射流的湍流特性·····	264
7.12	气体复杂混合流场的速度和浓度测量·····	272
7.13	激光测速用于流量测量·····	298
7.14	波-流相互作用流场的测量·····	304

7.15	三维流向涡流场的测量	309
7.16	火焰传播速度的测量	313
7.17	换热器流动的激光测量	315
7.18	防毒面具眼窗区流场的测量	319
7.19	微型喷嘴的流速和粒径测量	324
7.20	直升机旋翼三维流场的测量	327
7.21	流化床颗粒运动特性的测量	331
7.22	强旋气粒两相流动的测量	336
7.23	固体运动速度的测量	340
	参考文献	344

Contents

Preface	3
1 Introduction	1
1.1 Specialties of laser Doppler velocimetry	1
1.2 Review of LDV development	3
References	6
2 Principles and optics of laser Doppler velocimetry	7
2.1 Laser Doppler effect	7
2.2 Basic modes of configuration in laser velocimetry	9
2.3 Light scattering by small particles in laser velocimetry	13
2.4 Optical configurations and basic parameters of laser velocimetry	21
2.5 Principles and optics of 2D laser velocimetry	33
References	36
3 Signal processing of laser velocimetry	37
3.1 Properties of laser Doppler signals	37
3.2 Spectrum analysis	54
3.3 Frequency tracking demodulation	59
3.4 Frequency counting processing	74
3.5 Digital correlation processing	91
3.6 Digital Fourier transform signal processing	99
3.7 Intelligence and software of signal processing	108
References	111
4 Laser velocimetry system with optical frequency shifting	113
4.1 Principles and functions of frequency shifting	113

4.2	Methods of optical frequency shifting	119
4.3	Laser Doppler systems with variable frequency shifting	124
4.4	Frequency shifter applying in Multi-components LDV systems	126
	References	147
5	Advanced laser Doppler systems	149
5.1	LDV systems with optical fiber	149
5.2	Miniature laser Doppler systems	157
5.3	Doppler Global Velocimetry	166
	References	175
6	Phase Doppler sizing anemometry	177
6.1	Influences of particle tracers to fluid flows	177
6.2	Theoretical model of PDSA	183
6.3	Practical PDSA system	193
6.4	Fiber optical PDSA system	197
6.5	Measurement of velocity, size and temperature with rainbow PDSA	204
	References	210
7	Applications of laser Doppler system to complex flows	212
7.1	Turbulent separated flow measurements in a duct with backward facing step	212
7.2	Measurements of separated flow over a 2D rib	218
7.3	3D measurements in turbulent orifice flows	221
7.4	Measurements of turbulent characteristics in pipe flow with perforated plates	226
7.5	Vortex breakdown measurements with LDV system	230
7.6	LDV measurements in wake flow behind a vibrating cylinder	235
7.7	Correlation measurements of turbulent fluctuations	

using 2 point LDV system	238
7.8 Measurements of turbulence and wave parameters under bucket energy dissipaters	244
7.9 LDV diagnosis of flow field in liquid-liquid hydrocyclones	251
7.10 Method for measurement in liquid model using 3D dual-lens LDV/PDPA system	259
7.11 Measurement of turbulent characteristics of an air jet	264
7.12 Velocity and concentration measurements in air mixing pipe flow	272
7.13 Flow rate measurement using LDV technique	298
7.14 Wave-current interaction measurement in a flume	304
7.15 Streamwise vortex measurement behind a bluff body	309
7.16 Flame propagation velocity measurement with LDV system	313
7.17 Flow measurement within a heat exchanger	315
7.18 Velocity measurement in masks of respiratory protection	319
7.19 Velocity and size measurement in micro jets	324
7.20 3D-LDV measurements of rotor blade of helicopter	327
7.21 Measurement of particle flow characteristics in fluidized bed	331
7.22 Measurement in strongly swirling gas-particle flows	336
7.23 Velocity measurement of solid movement	340
References	344