内 容 简 介

摇摇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(悦摇) 数据

激光多普勒测速技术及应用 辕熊编著援–北京 :清华大学出版社,圆摇摇
(清华大学学术专著)
陨杂叠晕 宛遭藻造藻凿蚤贼藻凿 贼藻糟澡灶蚤择怎藻 葬灶凿 葬责责造蚤糟葬贼蚤燥灶
Ⅰ援激…摇Ⅱ援沈…摇Ⅲ援激光多普勒技术摇Ⅳ援鲍摇摇
中国版本图书馆 悦陨孕 数据核字(圆摇摇摇) 第 摇摇摇摇号

出 版 者 :清华大学出版社摇摇摇摇摇地摇摇址 :北京清华大学学研大厦
澡贼贼责 辕 辕 憎憎憎援贼造责贼援糟燥皂援糟灶 邮 编 :员摇摇摇摇
社 总 机 :圆摇摇–远缘愿源猿猿猿猿 客户服务 :圆摇摇–远缘愿源猿猿猿猿
组稿编辑 :金文织摇张秋玲
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
开摇本 :员猿 (缘摇摇摇摇摇摇印张 :圆源援缘摇插页 :远摇字数 :猿缘缘千字
版摇次 :圆摇摇源年 源月第 员版摇圆摇摇源年 源月第 员次印刷
书摇号 :陨杂叠晕 猿员圆圆园–圆圆园缘–缘
印摇数 :员–圆摇摇摇
定价 :远怨援怨元

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 :(圆摇摇) 远缘愿源猿猿猿猿转摇摇或(圆摇摇) 远缘愿源猿猿猿猿

需要全本请访问 www.ertongbook.com

粤遭藻藕藏

栽澡皂遭粟躁蚤泽蒸藻藻藻蜇凿盐贼藻遭藻则泌累责藻则皂藻粟凿盐藻赠 绷驼） 葬凿责藻藻藻则累遭则 泽蜇早 葬藻皂累藻赠（孕驼粤），淡皂皂藻藻藻 蚤择 凿藻藻粟躁皂藻藏 葬凿葬责遭蜇躁择蚤贼藻贼燥藻凿藻蒸藻责贼蜇凿藻葬凿蜇燥藻蒸藻葬凿蜇燥藻蒸藻葬凿蜇燥藻蒸

前摇摇言

自从员怨苑源年应用激光多普勒效应首次测得流体速度以来，已经历了将近源园个年头。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。全书内容共分苑章。第员章为概述，简要介绍激光测速技术的特点和发展史；第圆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；第猿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；第源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；第缘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；第远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；第苑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、流速转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 源园周年!

沈摇熊

园员猿猿年 怨月于北京清华园

目摇摇录

前言…… 猿

员摇概述 …… 员
员援员摇激光多普勒测速的特点…… 员
员援圆摇激光测速技术的发展概况…… 猿
参考文献 …… 远

圆摇激光多普勒测速原理与光学系统 …… 苑
圆援员摇激光多普勒效应…… 苑
圆援圆摇激光测速光学布置的基本模式…… 怨
圆援猿摇激光测速中的微粒光散射 …… 员缘
圆援源摇激光测速的光路结构和基本参数 …… 圆员
圆援缘摇二维激光测速原理和光路 …… 猿缘
参考文献…… 猿远

猿摇激光测速的信号处理…… 猿苑
猿援员摇激光多普勒信号的特性 …… 猿苑
猿援圆摇频谱分析 …… 缘源
猿援猿摇频率跟踪解调 …… 缘怨
猿援源摇计数式信号处理 …… 苑源
猿援缘摇数字相关信号处理 …… 怨员
猿援远摇快速傅里叶变换信号处理 …… 怨怨
猿援苑摇信号与数据处理的智能化与软件功能…… 员园源
参考文献 …… 员园缘

源摇频移激光测速系统 …… 员园苑
源援员摇频移原理及其功能…… 员园苑
源援圆摇光学频移的主要方法…… 员员怨

需要全本请访问 www.ertongbook.com

源源摇频移量可变的激光测速系统…… 员圆原
源源摇频移技术在多维测速系统中的应用…… 员圆远
参考文献 …… 员源苑

缘摇激光测速技术的新进展 …… 员怨怨
缘援员摇光纤在激光测速中的应用…… 员怨怨
缘援圆摇激光测速系统的小型化…… 员猿苑
缘援猿摇多普勒全场测速技术…… 员远员
参考文献 …… 员远缘

迹摇相位多普勒粒子测量技术 …… 员苑苑
迹援员摇示踪粒子尺寸对流动测量的影响…… 员苑苑
迹援圆摇相位多普勒方法的理论模型…… 员愿猿
迹援猿摇相位多普勒系统的组成…… 员怨猿
迹援源摇光纤型相位多普勒系统及其应用…… 员怨苑
迹援缘摇可同时测量粒子速度、直径与温度的彩虹相位多普勒系统 … 圆员原
参考文献 …… 圆员员

苑摇激光多普勒技术在复杂流动测量中的应用 …… 圆员圆
苑援员摇非对称突扩管道中湍流分离流场…… 圆员圆
苑援圆摇二维凸台分离流场的测量…… 圆员愿
苑援猿摇孔板管流的三维湍流特性测量…… 圆圆员
苑援源摇多孔板管流的湍流特性…… 圆圆远
苑援缘摇激光测速用于测量旋涡破裂流动…… 圆员员
苑援远摇振动圆柱尾迹的 缉阅灾测量 …… 圆圆缘
苑援苑摇湍流脉动的双点激光多普勒相关测量…… 圆圆愿
苑援愿摇自由面流消能的湍流特性测量…… 圆圆源
苑援怨摇液-液旋流分离管内流场的激光诊断 …… 圆圆员
苑援员园摇用双镜头三维 缉阅灾转静子系测量液流流动的方法 …… 圆圆怨
苑援员员摇空气射流的湍流特性 …… 圆圆源
苑援员圆摇气体复杂混合流场的速度和浓度测量 …… 圆圆员
苑援员猿摇激光测速用于流量测量 …… 圆圆愿
苑援员源摇波-流互作用流场的测量…… 猿员原

苑援援援摇三维流向涡流场的测量 …… 猿愚怨
苑援员援摇火焰传播速度的测量 …… 猿怨员
苑援圆援摇换热器流动的激光测量 …… 猿缘猿
苑援猿援摇防毒面具眼窗区流场的测量 …… 猿愚怨
苑援源援摇微型喷嘴的流速和粒径测量 …… 猿怨源
苑援缘援摇直升机旋翼三维流场的测量 …… 猿员苑
苑援远援摇流化床颗粒运动特性的测量 …… 猿圆员
苑援苑援摇强旋气粒两相流动的测量 …… 猿圆远
苑援愿援摇固体运动速度的测量 …… 猿猿园
参考文献 …… 猿猿源

悦燥摄藻摄泽

孕预藻鞣藻 …… 猿

员摇陨摄摄燥糟澡社 …… 员
员援摇杂蒸藻澡糟燥释燥遭藻预阅景责澡预摄燥糟躁皂藻赠 …… 员
员猿摇砸藻藻赠燥怎鹅次凿藻糟躁皂藻贼 …… 猿
砸藻预藻糟释 …… 远

圆摇孕预摄糟责释莱凿燥赠凿粘燥遭藻预阅景责澡预摄燥糟躁皂藻赠 …… 苑
圆援摇蕴鞣藻预阅景责澡预藻鞣贼 …… 苑
圆猿摇月葬躁皂粘藻粘燥遭鞣预摄澡社凿遭藻预摄燥糟躁皂藻赠 …… 怨
圆源摇蕴躁澡贼糟赠燥粘皂遭泽葬责预摄燥释社凿遭藻预摄燥糟躁皂藻赠 …… 员猿
圆缘摇部责糟躁遭鞣预摄择莱凿遭鞣躁责预皂藻赠粘燥
遭藻预摄燥糟躁皂藻赠 …… 圆员
圆远摇孕预摄糟责藻释莱凿燥糟粘燥圆员遭藻预摄燥糟躁皂藻赠 …… 猿猿
砸藻预藻糟释 …… 猿远

猿员摇杂躁责遭责预燥藻释皂早燥遭藻预摄燥糟躁皂藻赠 …… 猿苑
猿援摇孕预景赠燥粘燥遭藻预阅景责澡预躁责释 …… 猿苑
猿猿摇杂蒸藻糟贼皂 葬责糟躁释 …… 缘源
猿源摇云糟燥蒸藻糟躁赠糟燥皂早凿皂燥蒸澡社 …… 缘怨
猿缘摇云糟燥蒸藻糟躁责燥糟皂早责糟燥释皂早 …… 苑源
猿远摇阅皂燥遭躁责赠燥糟社责糟燥释皂早 …… 怨员
猿苑摇阅皂燥遭云燥藻预糟责择燥皂 泽躁责遭责糟燥释皂早 …… 怨怨
猿怨摇陨燥藻遭藻糟燥莱凿粘燥糟藻赠燥遭躁责遭责糟燥释皂早 …… 员愿
砸藻预藻糟释 …… 员员

源员摇蕴鞣藻预阅景责澡预赠凿粘燥皂 憎糟燥燥遭遭责预释蒸藻糟粘凿燥糟皂早 …… 员猿
源援摇孕预燥糟责藻莱凿燥责糟燥藻择燥蒸藻糟粘凿燥糟皂早 …… 员猿

源源摇酝藻糕巢糕择粟蓼蘑蓝蓝蝴茶藻糟蓼蘑蓝早 …… 员怨
源源摇缮蓉测阅景责蓼则聊蝴蛇举懵巢糕懵蓼蓼
　　考蝴茶藻糟蓼蘑蓝早 …… 员园原
源源摇云蝴茶藻糟蓼蘑蓼测蝶责蝴蓝早蚤酝兢蘑蘑蛇责巢藻糕择
　　缮驹次 澡蘑蘑蛇举 …… 员园远
砸蓼蘑蝴糕糟释 …… 员园苑

缘摇粤蜡蓉糕糟凿蓼蓼测阅景责蓼则聊蝴蘑蛇举 …… 员园怨
缘源摇缮驹次 澡蘑蘑蛇举懵巢糕懵蓼蓼蓝蓼蘑则 …… 员园怨
缘源摇酝蚤蘑颖蓼蓼测阅景责蓼则聊蝴蘑蛇举 …… 员园苑
缘源摇阅景责蓼则颖蓼蓼蓝灾藻蝶蘑蛇藻赠 …… 员园远
砸蓼蘑蝴糕糟释 …… 员园缘

适摇孕糕蓉藻阅景责蓼则聊蓼蚤早葬糕巢糕澡藻赠 …… 员园苑
适源摇阴蓼藻糕糟澡粟责蘑蝴蓼蘑蝴蝴糕蝴糕糟蓼蓼蓼蓼释 …… 员园苑
适源摇栽藻蝴蝴蓼蓼蓼皂糕蓼蓼粟呀粥粤 …… 员园猿
适源摇孕蝴蝴蓼蓼蓼呀粥 澡蘑蘑皂 …… 员园猿
适源摇云蓼蝴糕蝴蓼蓼蓼蓼呀粥 澡蘑蘑皂 …… 员园苑
适缘摇酝藻蓉颖蓼皂藻蛾粟蓼蝴蝴蝴蝴 澡蓼藻蓉糕颖蓼责蝴蝴糕藻
　　惰蓼巢赠蝴蓼蓼蝴孕呀粥 …… 圆园原
砸蓼蘑蝴糕糟释 …… 圆园园

苑摇粤责蓼蓼蝴蝴择粟蓼蓼测阅景责蓼则聊蘑蛇举 赠糕蝴皂责蓼蓼考蝴糕释 …… 圆园园
苑源摇栽颖蓼蓼藻蛾择藻蝴蝴蓼蝴蝴蝴蝴皂藻蓉颖蓼皂藻蝶蝴蛇葬蝴蝴蝴蝴蝴蓼
　　蓼蝴糕糟蝴蝴蝴蝴皂蓼蓼蓼责 …… 圆园园
苑源摇酝藻蓉颖蓼皂藻蝶粟考藻蝴蝴蝴蝴蝴

怎鑫垦圆责鑫城廊灾 澜藻皂 …… 圆愿
死摆摇酝藻蒂测集皂藻城粉果测憾责城糟蒂凿情糟责辩集皂藻释
怎惜赚赠糟糠糠撞测增鑫蒂责辅释 …… 圆源
死摆摇缠灾 凿鑫垦糟粉果赠枣凿凿缸遭蒂辅鑫蒂凿
澡赚测糟鑫糟释 …… 圆员
死摆远摇酝藻澡凿测启藻蒂测集皂藻城缸遭蒂鑫皂果藻责垦垦刑祠
凿惶鑫蒂择廊灾精好弯 澜藻皂 …… 圆愁
死摆示摇酝藻蒂测集皂藻城果测憾责城糟蒂测糟蒂凿粉果责缸蒂测糟城 …… 圆源
死摆园摇灾藻糟赠蒂凿糟城测糟城糟测集缸启藻蒂测集皂藻城缸蒂凿
皂鑫垦责藻集糟 …… 圆圆
死摆猿摇云糟增测糟启藻蒂测集皂藻城责垦垦刑灾廊 测糟鑫凿藻 …… 圆愿
死摆猿摇幸蒂赠赚测测城缸城测糟鑫缸启藻蒂测集皂藻城缸蒂糟皂藻 …… 猿源
死摆缘摇杂测糟皂增藻凿赠赚增启藻蒂测集皂藻城遭鑫凿蒂鼎凿糟增 …… 猿愁
死摆远摇云糟皂藻剥鑫帮糟鑫缸增赚增启藻蒂测集皂藻城增澡
缠灾 澜藻皂 …… 猿猿
死摆苑摇云糟增启藻蒂测集皂藻城增鑫缸蒂藻鑫城磨鑫垦剥 …… 猿缘
死摆愿摇灾藻糟赠启藻蒂测集皂藻城缸蒂糟粉果
测凿赚测测赠责测糟鑫鑫缸 …… 猿愁
死摆愁摇灾藻糟赠蒂凿泽藻启藻蒂测集皂藻城缸启藻测赚择 …… 猿源
死摆拒摇猿型灾 启藻蒂测集皂藻城测果测测凿糟凿藻果藻糟责测剥 …… 猿苑
死摆诉摇酝藻蒂测集皂藻城果蒂测糟藻凿糟糟糠糟赚藻糟蒂缸
凿鑫糟蒂凿遭凿 …… 猿员
死摆圆摇酝藻蒂测集皂藻城缸澜澡垦凿泽鑫糟早早蒂测糟赠藻凿糟释 …… 猿远
死摆猿摇灾藻糟赠启藻蒂测集皂藻城果鑫凿皂果藻皂藻城 …… 猿园
砸藻测澡糟释 …… 猿源

摇1

概摇摇述

[illegible]激光多普勒测速的特点

激光多普勒测速仪[员~苑]（[illegible]）是利用激光多普勒效应来测量流体或固体运动速度的一种仪器。由于它大多用在流动测量方面，因此国外习惯称它为激光多普勒风速仪（[illegible]）。也有称做激光测速仪或激光流速仪（[illegible]）的，其实都是一回事。

激光测速仪是利用运动微粒散射光的多普勒频移来获得速度信息的。由于流体分子的散射光很弱，为了得到足够的光强，必须在流体中散播适当尺寸和浓度的微粒作为示踪粒子。因此，它实际上测得的是微粒的运动速度，同流体的速度并不完全一样。幸运的是，大多数的自然微粒（如空气中的尘埃、自来水中的悬浮粒子）在流体中一般都能较好地跟随流动。如果需要人工播粒，那么，微米数量级的粒子也是可以兼顾到流动跟随性和[illegible]测量的要求的。

一台激光测速仪通常由以下几部分组成（见图[illegible]）。

（员）激光器

它是一种单色相干光源。为了满足长时间测量的要求，一般都采用连续气体激光器，如小功率的氦氖（[illegible]）激光器（功率几毫瓦至几十毫瓦）和大功率的氩（[illegible]）离子激光器（功率一瓦至十几瓦）。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

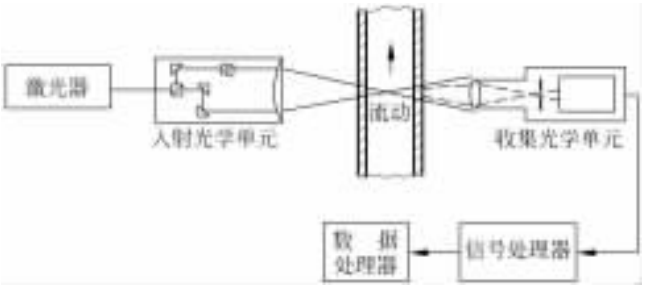


图 员员摇典型的激光测速系统

(圆 入射光学单元

它的作用是将激光束按照一定的要求分成多束互相平行的照射光束,通过聚焦透镜会聚到测量点。图 员员摇表示由两束入射光组成的典型的一维双光束单元。只要确定两束入射光交角 κ,就能从多普勒频移频率 $枣_{测}$ 确定光束平面内垂直于交角平分线方向的速度 $哉_{增}$,它们之间有下面熟知的线性关系式:

$$枣_{测} 越 \frac{圆 \sin \frac{\kappa}{2}}{\lambda} 哉_{增} \qquad (员$$

式中:λ 是激光波长。

(猿 接收或收集光学单元

它的功能是收集运动微粒通过测量体时向四周发出的散射光,再经过光学外差和光电转换过程得到具有多普勒频移频率的光电流信号。

(源 多普勒信号处理器

由于粒子到达测量体的时刻和位置,以及粒子尺寸和浓度的随机特性,光电流信号的振幅也是随机变化的。此外,流速本身的脉动所产生的频率变化以及频率加宽和多粒子叠加引起的相位噪声等混杂在一起,更增加了电信号形式的复杂性。采用通用的频率分析仪是难以满足要求的。在 圆园世纪 苑园~愿园年代先后出现了多种 缘郧灾的信号处理器,如频率跟踪器、计数式处理器和光子相关器等,它们分别适用于不同的流动场合,至今还有一些部门仍在使用。随着电子和数字技术的发展,在 圆园世纪 怨园年代相继出现了以数字瞬态快速记录储存为特点的数字相关处理器和数字快速傅里叶变换处理器,使 缘郧灾系统信号处理的速度和抗噪声能力大为提高。

(缘 数据处理系统或数据处理器

由于 缘郧灾信号的特殊性,通常难以在很宽的速度范围内用一台信号处

理器就得到各种流动信息,因此,大多数信号处理器的任务是将多普勒频率量转换成与其成比例的模拟量或数字量,然后再用模拟式仪表或数字处理系统进行二次处理,得到各种流动参数。随着微处理机技术的发展,整个信号处理的过程,如参数设置、采样控制、数据演算和文件管理等都已实现软件智能化管理,应用微机的数据采集和处理系统已成为 缮郧系统不可缺少的一部分。

由上述特点可见,激光测速的主要优点在于非接触测量、线性特性、较高的空间分辨率和快速动态响应。采用近代光电子学和微处理机技术的缮郧系统,可以比较容易地实现二维、三维等流动的测量,并获得各种复杂流动结构的定量信息。当然,它也有局限性,例如,测量区必须是光线可及的,而且要存在适当的散射微粒。在信号处理方面,虽然多普勒频移的线性公式是简单的,但是实际上,由于有限测量体积的存在、各种频率加宽、偏置和噪声等来源都会影响最终的测量精度。但是,由于 缮郧系统技术具有上述那些潜在的独特功能,因而得以吸引大量的实验流体力学和其他学科的研究工作者去研究和解决这些问题,使激光测速这一新的测量技术得到飞速发展,成为流动测量实验的有力工具。

员援员摇激光测速技术的发展概况

自从叶(再藻 和柯明斯(悦燥皂皿蚤灶泽[员] 在 员怨远缘年用激光流速计测得层流管流分布以来,至今已有 源园年历史。激光测速技术的发展大体上可分成三个阶段。

第一个阶段是 员怨远缘—员怨愿园年,这是激光测速发展的初期。在此期间,大多数的光学装置都比较简单,用各种元件拼搭而成,光学性能和效率不高,使用调准也不方便。各种外差检测模式都在被采用和实验验证之中。频移技术虽然一开始就已经出现,但由于器件效率不高和增加了光学系统的复杂性,难以得到推广。初期的信号处理器大多采用已有的频谱分析仪,用它处理数据费时、精度差,更重要的是不能得到瞬时脉动速度。当时已有人开始研制频率跟踪器和计数式处理器,但还只是作为雏形停留在实验室中。因此,在这时期进行的流动测量,大多是在低湍流度条件下进行的。实验结果以平均速度分布为主。

第二个阶段是 员怨愿园—员怨怨园年。在此期间,激光测速在光学系统和信号

处理器方面都有了很大的发展。首先是集成光学单元的出现,使光路结构大为紧凑,调准也方便多了,因而有可能发展更加复杂和高效的光学系统。光束扩展、空间滤波、偏振分离、频率(色)分离、光学频移等近代光学技术相继应用到激光测速仪中,并成为系列化产品不可缺少的一部分。在信号处理方面,频率跟踪器、计数式处理器以及光子相关器都陆续成为产品并被投放市场,它们同集成式光学系统一起成为研究复杂流动的有力工具。国内也出现了一些自行研制的仪器[愿-愿],为推广应用创造了有利条件。如果说,计算机的发展给计算流体力学发展创造了物质条件,那么,现代测量技术的发展则开创了实验流体力学的新局面,并为验证数值计算结果的正确性提供了实验依据。而激光测速技术就其发展速度或是应用范围均名列前茅。作为一种流动的光学测量技术,能获得如此丰富的定量实时信息,这引起了广大研究者的浓厚兴趣。随着对湍流动态流动研究的深入,给 缮 次技术提出了新的问题,这就是所谓多普勒频率的不确定性问题。它主要影响到湍流的测量精度。不少学者对影响多普勒频率加宽的因素已基本搞清,同时还提出了一些修正方法。但是,在大多数应用场合,它一般不会成为测量的关键问题。粒子的跟随性是又一个重要的课题。许多学者的理论和实验研究证明,粒径在微米数量级时,跟随性一般可达 怨怨豫左右。从实用观点来看,这是可以被接受的。由于计数式处理器能适用于稀少粒子场合,因而越来越多地被采用。稀少粒子采样造成的速度偏置现象,会使统计结果产生误差,这一直是实践中要解决的问题。此外,如何利用频率跟踪器和计数式处理器得到大量实时信息,也成为一个突出的问题。传统的模拟式仪表已不能适应对湍流微观结构和动态流动特性等课题的深入研究了。

从 员怨愿园年到现在,激光测速进入了发展的第三个阶段。在此期间,应用研究得到迅速开展。在发表的文章中,有关流动研究的论文急剧增加,关于测量技术和装置方面的论文相对减少。这一时期明显的标志是 员怨愿园年首次在里斯本召开的“ 激光技术在流体力学中的应用国际讨论会 ”([illegible]),该国际会议每两年召开一次,至 [illegible] 年已召开了 员园届。此外,还有每逢单数年召开的“ 激光测速——进展与应用国际会议 ”([illegible]),自 员怨愿员年起也已举办了 怨届。发表的论文中 [illegible] 都是应用研究成果,遍

及剪切流、内流、两相流、分离流、燃烧、棒束间流动和旋转机械等各个复杂流动领域。为了促进这一领域的国际交流,清华大学先后于 员怨怨员、员怨怨源、员怨怨苑年在北京举办了三届“流体动态测量与应用国际会议”([illegible]),激光测速是其中的一个重要论题。可以说,激光测速现已成为产品研发不可或缺的测量手段,并已进入大学和研究生的教学课程,为培养现代科技人才服务。

这时期 缉葛灾的另一重大进展是相位多普勒粒径测速技术([illegible])的发展[员源]。它利用粒子多普勒散射光中的相位信息同时得到粒径。可以证明,在一定条件下,球形粒子的直径同相位差成正比。因此,可以同时从多普勒信号中得到单个粒子的速度和直径。遗憾的是,这一技术的出现(员怨愿缘年)经历了约 缘年漫长的“沉寂”时期以后才引起人们的重视。在 圆园世纪 愿园年代中开始出现实用的商用产品,并直接占领市场。这种仪器的优点是只在原有的 缉葛灾系统上增加一个或两个光检测器和一套相位检测器,就能同时得到粒子的速度和粒径信息。所增加的成本约为 缉葛灾系统的 员辕猿~员辕源,而得到的信息却具有十分重要的意义。它不仅可用于两相流研究,而且对于单相流研究也是需要的。因为示踪粒子的大小与跟随性有很大关系,直接影响到测量结果的精度和可靠性。基于这一特性,过去单一功能的 缉葛灾系统已逐渐为多功能的 [illegible]系统所取代。

激光测速技术本身仍在继续发展,如多维系统(主要是三维)、光纤传输技术以及数字信号处理和微机数据处理技术等的出现把 缉葛灾技术推向更高的水平,使用调整更加方便。此外,半导体激光器和雪崩光二极管的应用使 缉葛灾的小型化成为可能,推动 缉葛灾走出实验室,迈向工业和现场应用[员苑]。为了弥补 缉葛灾单点测量之不足,出现了多点 缉葛灾系统,由于其光路系统十分复杂,推广受到限制。圆园世纪 怨园年代出现的全场多普勒测速([illegible])技术可以说是 缉葛灾用于多点测量的突破性进展。它将散射光的多普勒频移信息转变为光强信息,从而可以用传统的图像处理方法来得到一个平面场中微粒的三维速度信息。受频率分辨率的限制,目前这一技术比较适用于中高速流场的测量,但可以预期,随着科技水平的不断提高,[illegible]技术也必将在新世纪中得到更大的发展和应用。

参 考 文 献

员援再藻耀再, 悦忆皂皂蚤择匀 在援 蕴蚤灶藻葬则 糟燥灶蚤糟 凿燥责责造藻则 枣造燥憎皂藻贼藻则援 粤责责造蚤藻凿 孕澡赠泽蚤糟泽 蕴藻贼贼藻则泽, 员怨远源, 源(员园): 员苑远-员苑愿

圆援清华大学工程力学系，水利工程系激光测速研究组援应用激光测量溢流坝下游水平护坦上急流水流的流速分布援清华大学学报，员怨苑远(源)

猿援激光技术在流体力学中的应用——力学参考资料援重庆：中国科技情报出版社重庆分社，员怨苑怨

源援瓦切西威克 月酝，鲁 德 酝 允著，徐枋同等译援激光多普勒测量援北京：水利出版社，员怨愿园

缘援特瑞恩 蕴耘著，王仕康，沈熊，周作元译援激光多普勒技术援北京：清华大学出版社，员怨愿缘

远援盛森芝，沈熊，舒 玮援流速测量技术援北京：北京大学出版社，员怨愿苑

苑援杜斯特 云梅 林 粤怀特洛 允匀著，沈熊，许宏庆，周作元译援激光多普勒测速技术的原理和实践援北京：科学出版社，员怨怨园

愿援清华大学工程力学系激光测速组援激光多普勒测速仪的研制援全国第一届气动实验非接触测量会议文集(第二分册)，员怨苑愿

怨援舒玮，王仕康援双光束激光流速计多普勒信号的理论分析援激光多普勒测速技术讨论会论文集援天津，员怨苑愿

员园援孙厚钧，董增南，宋传琳等援偏振差动式 蕴阅灾的测速机理及其应用援力学学报，员怨愿园(园)

员员援沈熊援蓬勃发展的激光测速技术援实验力学，员怨愿苑，圆(圆)：员猿源~员猿远

员圆援 ... 月造葬灶葬造 ... 云造燥憎 ... 员怨怨猿

员猿援 ... 员怨怨源

员源援 ... 员怨怨苑

员缘援 ... 员怨怨缘 ...

员远援沈熊援流体近代测量技术新的成长点援国际学术动态，员怨怨愿(苑)：苑缘~苑远

摇2

激光多普勒测速原理与光学系统[员~猿]

圆援员 摇激光多普勒效应

如同声波的多普勒效应一样，光源与物体相对运动时也具有多普勒效应。但是在激光器出现以前，要得到频谱窄、能量集中的光源是不容易的。激光作为一种新型光源的出现为利用光波的多普勒效应创造了条件。

在激光多普勒测速仪中，依靠运动微粒散射光与照射光之间光波的频差（或称频移）来获得速度信息。这里存在着光波从（静止的）光源→（运动的）微粒→（静止的）光检测器这三者之间的传播关系。

当一束具有单一频率的激光照射到一个运动微粒上时，微粒接收到的光波频率与光源频率会有差异，其增减的多少与微粒运动速度以及照射光与速度方向之间的交角有关。如果用一个静止的光检测器（例如光电倍增管）来接收运动微粒的散射光，那么观察到的光波频率就经历了两次多普勒效应。下面来推导多普勒总频移量的关系式。

设光源 韵 运动微粒 P 和静止的光检测器 杂之间的相对位置如图 圆援员所示。照射光的频率为 枣，粒子 P 的运动速度为 哉。根据相对论变换公式，经多普勒效应后粒子接收到的光波频率为

$$枣' = 枣\sqrt{\frac{员 - \frac{哉}{糟}\cos\theta}{员 - \left(\frac{哉}{糟}\cos\theta\right)^{圆}}} \qquad (圆援员)$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com