

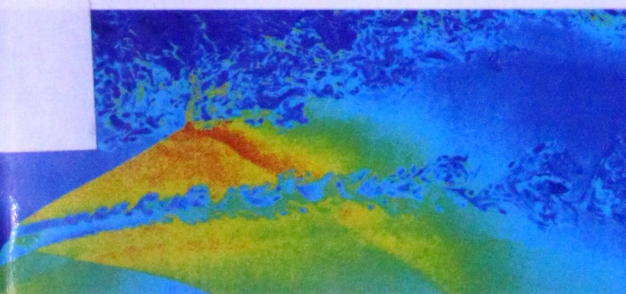
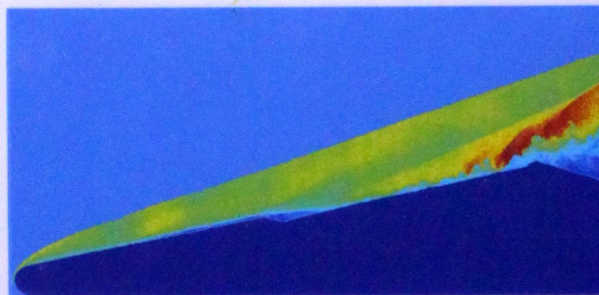
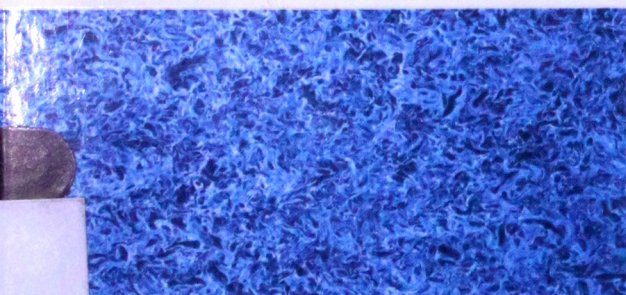


國防科技圖書出版基金

超声速流场NPLS精细测试技术 及典型应用

NPLS Technique and Its Typical Applications
on Supersonic Flows

■ 易仕和 赵玉新 田立丰 何霖 陈植 著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

014003026

V47
28



国防科技图书出版基金

超声速流场 NPLS 精细测试技术及典型应用

NPLS Technique and Its Typical Applications on
Supersonic Flows

易仕和 赵玉新 田立丰 何霖 陈植 著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1688539

V47
28

050800-10

图书在版编目(CIP)数据

超声速流场 NPLS 精细测试技术及典型应用/易仕和
等著. —北京:国防工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-118-08526-6

I. ①超... II. ①易... III. ①高超音速飞行器 -
超音速流动 - 流场测试 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 044433 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 插页 6 印张 6 $\frac{5}{8}$ 字数 221 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 69.80 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

超声速流场的非接触精细测量与高分辨率流动显示,一直是超声速飞行器研制中需求迫切却难以很好解决的问题。传统的超声速流动显示与测量方法主要包括纹影、阴影和干涉等方法,这些传统方法的空间分辨率低。超声速飞行器流场速度高,且具有明显的三维时空特性,这类复杂流场使得传统方法在定量测量时存在较大的局限性。激光诊断技术利用示踪物跟随流体一起运动,并根据示踪物的光散射或光谱激发特性分析流场的结构,可以获取定量的多参数流场信息,如密度、温度、压力、组分和速度等。利用激光散射特性的方法主要包括平面激光米氏散射(Planar Laser Mie Scattering, PLMS)、滤波瑞利散射(Filtered Rayleigh Scattering, FRS)、粒子图像速度场(Particle Image Velocimetry, PIV)以及多普勒全场测速技术(Doppler Global Velocimetry, DGV);利用光激发特性的方法包括激光诱导荧光技术(Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF)、分子标记测速技术(Molecular Tagging Velocimetry, MTV)以及相干反斯托克斯拉曼散射技术(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering, CARS)等。超声速流场的高速度、大梯度、强间断和多尺度的特征使得上述流动测量技术面临诸多困难。基于米氏散射的粒子示踪成像技术(如PIV技术)在测量超声速流场,尤其是带有激波和旋涡等局部加速度很大的超声速流场时,示踪粒子往往无法跟随流动的大梯度变化。基于分子示踪的测量方法(如PLIF技术)应用于超声速流场测量时,信号较弱,信噪比较低,目前还难以实现高

时空分辨率的流场测量。超声速流场的精细测量仍然面临巨大的挑战。

随着脉冲激光器技术、纳米技术、高精度同步技术、数值图像技术和高分辨率 CCD 技术的飞速发展,以及这些技术在实验空气动力学研究领域的应用,超声速流场的高分辨率流动显示与非接触精细测量技术的发展面临难得的机遇。为满足对超声速流场高时空分辨率测量的需求,作者近年来提出了新型的(高)超声速流场高分辨率测量和流动显示的原理和方法——基于纳米示踪的平面激光散射技术(Nano-tracer Planar Laser Scattering, NPLS)。NPLS 技术的基本原理,是在超声速流场中均匀撒播纳米示踪粒子,采用脉冲激光照明流场,利用高分辨率 CCD 相机拍摄纳米示踪粒子图像。基于 NPLS 技术的原理,开发了超声速三维流动精细结构的显示技术,以及密度场、速度场、气动光学波前等参数的精细测量技术。该技术的核心是采用纳米量级的粒子作为流动的示踪粒子,所谓纳米粒子是指晶粒尺寸为纳米量级的超细颗粒,它具有其它微米量级粒子所没有的奇异特性,如声、光、电、磁、热等特性,并呈现新的小尺寸效应。NPLS 技术所利用的正是纳米示踪粒子的小尺度效应,缩短粒子松弛时间,实现超声速流场中激波与湍流结构的高分辨率成像。同时,纳米示踪粒子在超声速流动中的良好跟随性也使得超声速流场速度场和密度场定量测量成为了可能。

另外,流场图像处理是流体力学与图像处理、分析和理解等技术相交叉的新兴学科方向,在超声速流场精细结构测量中具有重要的基础性地位:时间平均流动参数测量、时空相关脉动量计算、湍流猝发特性检测以及湍流耗散特性分析等需要采用图像的时间或空间统计方法来实现;转捩流场的纹理分析、边缘检测、区域分割、拓扑描述和空间配准等需要采用图像分析技术来实现;运动流场的单点粒子跟踪、速度场分布和拟序结构变形等需要采用粒子追踪、互

相关分析、最小二乘匹配以及光流计算等基于图像的运动分析方法来计算;拟序结构与湍流的多尺度特征需要采用本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)、分形几何和小波变换等工具进行多分辨率分析。以 NPLS 技术所获得的高时空分辨率精细流动结构图像为基础,借助现代图像处理技术,可以获取更加丰富的超声速流动信息。

本书内容主要分为两大部分,第一部分包括第 1 章~第 3 章,第 1 章首先介绍了目前超声速流动显示与测量的相关技术,分析比较了各种方法的优缺点。第 2 章介绍了 NPLS 技术的原理和系统组成,并分析了该技术的性能。第 3 章介绍了在 NPLS 技术的基础上开发的超声速流场定量测量技术的原理和方法,包括超声速流动速度场测量、密度场测量和雷诺应力测量等技术。第二部分内容包括第 4 章~第 7 章,介绍了 NPLS 技术在典型超声速流动实验研究中的应用,其中包括超声速混合层、超声速导弹绕流流场、超声速边界层,激波湍流边界层相互作用以及后台阶流动的精细结构的显示、速度场、密度场等参数的定量测量,以及基于上述参数对超声速流动特性的相关研究。本书第 1 章~第 3 章由易仕和编写,第 4 章由赵玉新编写,第 5 章由田立丰编写,第 6 章和 7.1 节由何霖编写,7.2 节由陈植编写,最后由易仕和教授统一校对全稿。本书可以作为空气动力学、航空宇航等相关专业的教师、研究生和研究人员参考书。

本书是作者对近 10 年来相关研究成果的总结,基于本书内容共计发表相关学术论文 70 余篇,被 SCI 和 EI 检索收录 46 篇次,其中 26 篇发表在《中国科学》、《科学通报》、《Shock Waves》、《Applied Optics》等学术刊物上。基于相关实验设备,申请国家发明专利 10 项、国防专利 2 项;相关研究还获 2011 年度军队科技进步一等奖。

本书的出版得到了国防工业出版社“国防科技图书出版基金”的资助。相关研究工作获得了一些单位的大力支持,包括中国航天

空气动力技术研究院、中国空气动力研究与发展中心、中国航天科工集团第二研究院、北京大学等单位,作者对此深表感谢!尤其要感谢中国航天科技集团庄逢甘院士、中国科学院力学所俞鸿儒院士、中国空气动力研究与发展中心乐嘉陵院士、中国航天空气动力技术研究院沈清研究员、北京大学余振苏教授和李存标教授、中国科学院力学所姜宗林研究员、中国科技大学杨基明教授对本项研究工作的大力支持和帮助!

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

著者

目 录

第 1 章 超声速流动显示与测量技术	1
1.1 超声速流动显示与测量的关键问题	2
1.1.1 超声速流动的特征	2
1.1.2 超声速流动对显示与测量技术的要求	4
1.2 基于密度场的流动显示与测量技术	6
1.2.1 阴影方法	6
1.2.2 纹影方法	7
1.2.3 干涉方法	8
1.3 基于示踪粒子的流动显示与测量技术	9
1.3.1 平面激光米氏散射技术	10
1.3.2 粒子图像速度场	11
1.3.3 激光诱导荧光技术	12
第 2 章 基于纳米示踪的平面激光散射技术	14
2.1 NPLS 系统组成及工作原理	14
2.2 定量流场成像系统分析	18
2.2.1 光源	19
2.2.2 相机	20
2.2.3 信号和噪声	22
2.2.4 空间分辨率	24
2.2.5 图像校准	27
2.2.6 示踪物的选择	29

2.3	纳米粒子动力学与光散射性能分析	29
2.3.1	纳米粒子的动力学性能	29
2.3.2	纳米粒子的光散射特性	37
2.4	NPLS 系统性能分析	44
2.5	NPLS 图像处理基本原则	46
第3章	基于 NPLS 技术的超声速流场参数定量测量技术	50
3.1	基于 NPLS 技术的超声速流动密度场测量技术	50
3.1.1	基于 NPLS 技术的超声速流动密度场测量 原理	51
3.1.2	NPLS 图像校正	52
3.1.3	密度—图像灰度关系式的校准方法	54
3.1.4	超声速流动密度场测量技术的误差分析	55
3.2	超声速 PIV 技术	57
3.2.1	超声速 PIV 系统的组成及工作原理	58
3.2.2	超声速 PIV 算法	59
3.2.3	超声速 PIV 测量的误差分析	65
3.3	基于 NPLS 技术的速度场、密度场同时测量技术	66
第4章	NPLS 技术在超声速混合层实验研究中的应用	69
4.1	超声速混合层风洞	69
4.2	超声速混合层流向结构	71
4.2.1	流向涡结构的时空特征	72
4.2.2	流向涡结构的时空演化特征	75
4.3	超声速混合层展向结构	79
4.3.1	展向结构的时空特征	79
4.3.2	展向结构的时空演化特征	82
4.4	超声速混合层增长速度	83
4.4.1	增长速度的测量方法	84

4.4.2	成像技术对增长速度的影响	86
4.5	混合界面的分形特征	88
4.5.1	混合界面的提取方法	89
4.5.2	分形度量方法	90
4.5.3	混合界面分形沿流向的变化特征	93
4.6	超声速混合层密度场结构	94
4.6.1	混合层密度场结构	94
4.6.2	密度场三维近似重构及其光程差分布	95
4.6.3	密度脉动信号频域特征	96
4.6.4	密度场的多分辨率分析	100
4.7	超声速混合层速度场结构	108
第5章	NPLS 技术在超声速弹头流场实验研究中的应用	116
5.1	超声速风洞	116
5.2	超声速弹头流场精细结构	118
5.3	超声速弹头流场的速度分布	122
5.4	超声速弹头流场的密度分布	127
第6章	NPLS 技术在超声速边界层实验研究中的应用	130
6.1	平板边界层流向结构	131
6.2	平板边界层展向结构	133
6.3	平板边界层特征拟序结构识别	137
6.4	平板湍流边界层速度场结构	141
6.4.1	流向速度场结构	141
6.4.2	展向速度场结构	149
6.5	密度场测量	154
6.5.1	超声速湍流边界层密度场结构	154
6.5.2	湍流边界层速度场、密度场同时测量	157

第 7 章 NPLS 技术在其他典型流动中的应用.....	161
7.1 激波/湍流边界层相互作用的实验研究	161
7.1.1 激波/湍流边界层相互作用流向结构	162
7.1.2 激波/湍流边界层相互作用展向结构	167
7.2 超声速后台阶流动的实验研究	170
附录 英文缩略词汇表	178
参考文献	180
彩图	192

Contents

Chapter 1	Visualization and measurement techniques for supersonic flows	1
1.1	Key problem for visualization and measurement of supersonic flows	2
1.1.1	Characteristic of supersonic flows	2
1.1.2	Requirement for visualization and measurement of supersonic flows	4
1.2	Density based flow visualization and measurement methods	6
1.2.1	Shadow	6
1.2.2	Schlieren	7
1.2.3	Interference	8
1.3	Tracer based flow visualization and measurement methods	9
1.3.1	PLMS	10
1.3.2	PIV	11
1.3.3	PLIF	12
Chapter 2	Nanoparticle-tracer planar laser scattering technique	14
2.1	Setu Pand working principle of the NPLS system	14

2.2	Quantitative analysis of the flow imaging system	18
2.2.1	Light source	19
2.2.2	Camera	20
2.2.3	Signal and noise	22
2.2.4	Spatial resolution	24
2.2.5	Image calibration	27
2.2.6	Selection of seed particles	29
2.3	Characteristic of scattering light and dynamics behavior of nanoparticles	29
2.3.1	Dynamics behavior of nanoparticles	29
2.3.2	Characteristic of light scattered by nanoparticles	37
2.4	Analysis the performance of the NPLS system	44
2.5	Principle of the NPLS image processing	46

Chapter 3	Quantitative measurement methods for supersonic flows based on the NPLS technique	50
3.1	Density measurement method based on the NPLS technique	50
3.1.1	Principle of the density measurement method	51
3.1.2	NPLS image calibration	52
3.1.3	Calibration of the relationship between gas density and image grayvalue	54
3.1.4	Measurement errors of the density measurement method	55
3.2	Supersonic PIV method	57
3.2.1	Setu Pand working principle of the supersonic	

PIV system	58
3.2.2 Algorithm of the supersonic PIV	59
3.2.3 Measurement errors of the supersonic PIV	65
3.3 Simultaneous measurement of velocity and density based on the NPLS technique	66

Chapter 4 Applications of the NPLS technique in the experimental studies of supersonic mixing

layers	69
4.1 Supersonic mixing layer wind tunnel	69
4.2 Streamwise coherent structures of supersonic mixing layers	71
4.2.1 Spatial characteristic of streamwise structures	72
4.2.2 Temporal evolution of streamwise structures	75
4.3 Spanwise coherent structures of supersonic mixing layers	79
4.3.1 Spatial characteristic of spanwise structures	79
4.3.2 Temporal evolution of spanwise structures	82
4.4 Growth rate of supersonic mixing layers	83
4.4.1 Method of measuring the growth rate	84
4.4.2 Influence of flow imaging on the measurement of growth rate	86
4.5 Fractal characteristic of supersonic mixing layers	88
4.5.1 Method of identifying the mixing interfaces	89
4.5.2 Method of the fractal measurement	90
4.5.3 Variation of the fractal characteristics along the streamwise direction	93
4.6 Density structures of supersonic mixing layers	94