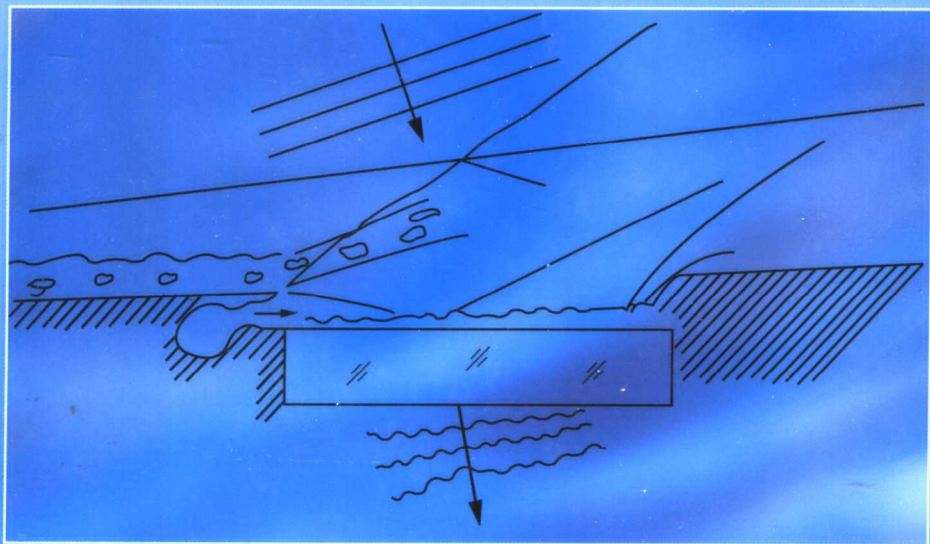


气动光学

Aero-Optics

李桂春 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

气 动 光 学

Aero-Optics

李桂春 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

气动光学 / 李桂春编著. —北京: 国防工业出版社, 2006. 1

ISBN 7-118-04168-8

I. 气... II. 李... III. 空气动力学: 光学 IV.
①V211.1②043

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 110607 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850 × 1168 1/32 印张 18 1/4 475 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 64.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

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**

序

军事科学技术和航空航天技术的迅速发展,加快了空气动力学各方面基础问题的研究进程,使空气动力学作为一门重要学科,全方位展现在空间科学技术的前沿,成为最重要的基础理论之一。在新型的高超声速飞行器开发研究中,在应用空气动力学理论的同时也展示了空气动力学新的发展方向。气动光学的发展就是一个很好的证明,与气动力学、气动热学可以相提并论的气动光学已经成为空气动力学的重大论题之一。学科之间的相互渗透,大大地丰富了空气动力学的内涵。

空气动力学中的气体流场密度与光学中的气体折射率是这两门学科相互链接渗透的基本因素;气体密度或折射率的脉动是气动光学研究的基本核心;而力学中的质量守恒原理以及连续方程是学科间相互关联的纽带。作为空气动力学流场显示的传统的光学测量方法,包含着空气动力学与光学的一脉相承的关系。

实验空气动力学与光学之间的密切关系,推动了光学测量技术的发展。这些新的测量方法结合微光学、光化学、光子学以及现代计算机技术,使测量技术的先进性上升到一个新的台阶。新的测量技术的产生,促进了气动光学效应验证试验原理和方法的研究发展,也加快了空气动力学研究工作的步伐。

气动光学专著抓住了交叉学科的关键,深入论述了气动光学中光波在不均匀介质中传输的基本原理,具有一定的理论深度,同时又总结了风洞试验中传统的光学测量方法以及最新技术,体现了课题研究的实用性。适应气动光学理论研究和工程设计验证试

验需要,展示了气动光学研究发展的潜力,有利于提高实验空气动力学的测试技术水平。

气动光学是一门新的交叉学科,气动光学具有重要的基础研究意义,有助于高超声速武器装备发展中有关空气动力学基础问题的探索。“气动光学”专著较全面系统地论述了气动光学原理和实验研究方法,是现代空气动力学的一个组成部分,将带动相关学科跨越式发展,拓展学科的研究领域,对国民经济建设及国防现代化建设具有实际的工程应用价值。

中国科学院院士 庄逢甘

前 言

空气动力学是航空航天技术中一门重要的基础理论学科,而气动光学又是空气动力学与光学之间的一门新的交叉学科。随着空间技术和高超声速武器装备技术的发展,气动光学研究备受关注,在空气动力学范围内,形成了以气动力、气动热和气动光学为基本内容的三个研究方向,在武器装备研究中,三管齐下,全面探索高超声速武器和空间技术发展产生的空气动力学基础问题。

由质量守恒原理和连续方程揭示的介质密度与折射率之间的链接关系,表明光学与空气动力学之间是一脉相承的,气动光学必然应运而生。气动光学研究的主要内容是高超声速流场对光波传输和光学成像的影响,简称为气动光学影响。其本质是研究可压缩流场密度分布与光波传输特性之间的相互关系。

本书是作者在航空气动力技术研究院几十年的工作、学习和研究的结果。内容广泛,分两篇论述,即气动光学原理和气动光学试验测量方法。这有助于读者对气动光学研究对象、基本理论和试验方法有比较完整和详细的了解。

气动光学的第1篇——气动光学原理。重点分析光线在不均匀介质中传输的基本原理,即研究光线在气体折射率梯度场(∇n)和梯度的散度场($\nabla^2 n$)中的传输规律。气体透镜的基本原理更具特点,气体透镜不同于玻璃透镜,对它的研究有助于相关前沿课题的开拓,对某些方面的研究可能产生新的思路,开创新的局面。波面畸变原理和光线追迹原理作为气动光学理论和试验研究的重

要基础,文中分别作了详细的论述。此外,还简要介绍了气动光学研究的应用对象,气体的动力学特性和光学特性。最后分析了傅里叶变换在气动光学中的应用和气动光学计算模型。

气动光学第2篇——气动光学试验测量方法。介绍在气动光学研究中基本的测量方法和主要参数测试的最新技术。主要内容包括,风洞全模型光学传输验证试验,飞行器周围高速流场参数测量和流场显示以及光束在流场中传输引起的光束偏折和波面畸变的测量。这些测量方法为气动光学实验研究提供了新的思路和行之有效的实验途径。

编著本书的目的是推动气动光学研究工作的发展,满足从事相关学科的科学工作者和工程技术人员的实际需要。本书也可供高等院校有关专业的研究生和本科生使用。

本书出版之际,衷心感谢空气动力学专家庄逢甘院士、崔尔杰院士的热情关心和大力支持。对国防科技图书出版基金的资助深表谢意。

鉴于国内目前尚无气动光学学科方面的专著,本书的编著将填补这方面的空缺。限于作者的水平,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2005年5月

目 录

第 1 篇 气动光学原理

绪论	1
第 1 章 气动光学现象	12
1.1 平台气动光学	14
1.2 凹腔气动光学	18
1.3 凸台气动光学	20
1.4 内系统气动光学	22
1.5 高能激光器谐振腔气动光学	25
参考文献	30
第 2 章 气体的动力学特性和光学特性	32
2.1 气体的动力学特性	32
2.2 气体的光学折射性	38
2.3 气体透镜	44
2.4 光学折射率与气体状态参数的变化	48
2.5 气体混合层的光学特性	59
2.6 激波和附面层的光学特性	63
参考文献	75
第 3 章 光线传播的高等光学原理	77
3.1 非均匀介质中光的传播	78
3.2 费马原理	89
3.3 哈密尔顿表达式	96
3.4 光量子理论	102

3.5 质量守恒原理	114
参考文献	122
第4章 气动光学的波面畸变理论	123
4.1 非均匀介质引起的衍射像差	124
4.2 波面相位畸变	130
4.3 点扩散函数	139
4.4 斯特列尔比	145
4.5 多孔无穷远衍射	154
4.6 湍流混合层引起的光强减弱	156
参考文献	161
第5章 气动光学的光线追迹理论	163
5.1 光线在折射率场中的偏折	164
5.2 光线传输方程	177
5.3 折射率梯度场和散度场	193
5.4 空间折射率梯度与光束偏折角	204
5.5 偏折角均方差与湍流相关函数	215
参考文献	217
第6章 气动光学中的傅里叶变换	219
6.1 光波传输的空间频率	219
6.2 空间频率滤波	232
6.3 光学传递函数	252
6.4 湍流折射率场的功率谱	264
参考文献	271
第7章 气动光学计算模型	272
7.1 平均流场气动光学模型—格子模型	273
7.2 统计气动光学模型—亚格子模型	274
7.3 光线追迹和光程差计算	278
7.4 气动光学参数和验证性测量方法	281
参考文献	288

第2篇 气动光学试验测量方法

第8章 气动光学效应风洞模拟试验方法	290
8.1 探测窗光束传输的模型试验	290
8.2 探测窗热辐射的模拟试验	304
8.3 探测窗的冷却模拟试验	313
8.4 凸台和凹腔模型的风洞试验	339
参考文献	344
第9章 流场显示的纹影方法和阴影方法	347
9.1 纹影法和阴影法	348
9.2 纹影光学系统	367
9.3 纹影光阑和观察窗	392
9.4 纹影仪装置	406
参考文献	415
第10章 流场显示测量的激光光片散射方法	417
10.1 微粒引起光的散射	419
10.2 可压缩剪切/混合层	422
10.3 平面光片散射原理	425
10.4 试验方法及应用	431
参考文献	443
第11章 流场密度分布测量的干涉方法	446
11.1 光波传播的光程差	447
11.2 双光束干涉法	459
11.3 点衍射干涉法	465
11.4 全息干涉法	472
11.5 剪切干涉法	489
参考文献	503
第12章 传输光束的偏折测量和波面畸变测量	506
12.1 小孔径光束技术	506

12.2 波面传感器方法	525
12.3 光折变晶体调制器方法测量湍流功率谱	545
参考文献	564

CONTENTS

Part One Aero-Optical Foundations

Introduction	1
Chapter 1 Aero-Optics Phenomena	12
1.1 Platform Aero-Optics	14
1.2 Cavity Aero-Optics	18
1.3 Turret Aero-Optics	20
1.4 Intrasystem Aero – Optics	22
1.5 High Energy Laser Cavity Aero-Optics	25
References	30
Chapter 2 Kinetic and Optic Properties of Gases	32
2.1 Kinetic Properties of Gases	32
2.2 Optic Refractivity of Gases	38
2.3 Gas Lens	44
2.4 Refractive Index Variation with Gas Condition	48
2.5 Mixing Layer of Gases	59
2.6 Shock Wave and Boundary Layer	63
References	75
Chapter 3 Advanced Optics Principles of Light	
Propagation	77
3.1 Light Propagation in Inhomogeneous Medium	78
3.2 Fermat's Principle	89
3.3 Hamilton Operator	96

3. 4	Light Quantum Theory	102
3. 5	Liouville's Principle	114
	References	122
Chapter 4 Wave-front Distortion Theory of Aero-		
	Optics	123
4. 1	Diffraction Aberrations of Inhomogeneous Medium ...	124
4. 2	Wave-front Phase Distortion	130
4. 3	Point Spread Functions	139
4. 4	Strehl-ratios	145
4. 5	Multiple Aperture Far-field Diffraction	154
4. 6	Beam Degradation for Turbulent Mixing Layer	156
	References	161
Chapter 5 Ray Tracing Theory of Aero-Optics		
	163	
5. 1	Beam Deflection in Refractive Index Fields	164
5. 2	Propagation Equations of Light Rays	177
5. 3	Refractive Index Gradient and Divergence Fields	193
5. 4	Spatial Refractive Index Gradient and Angle of Deflection	204
5. 5	Angle of Deflection and Turbulence Correlation Function	215
	References	217
Chapter 6 Fourier Transformation in Aero-Optics		
	219	
6. 1	Spatial Frequency of Light wave Transmission	219
6. 2	Spatial Frequency Filter	232
6. 3	Optical Transfer Function	252
6. 4	Power Spectra of Turbulence Refractive Index Fields	264
	References	271
Chapter 7 Aero-Optic Modeling		
	272	
7. 1	Mean Flow Aero-Optic Models—Grid Models	273

7.2	Statistical Aero-Optic Models—Sub-grid Models	274
7.3	Tracing Ray and Estimation of Optical Path Difference	278
7.4	Aero-Optic Performance and Validated Measuring Systems	281
	References	288

Part Two Measuring Methods for Aero-Optical Tests

Chapter 8	Wind Tunnel Simulating Test Methods for Aero-Optics Effects	290
8.1	Model Tests of Detection Windows for Beam Transmission	290
8.2	Simulating Tests of Aero-Thermal Radiation of Seeker Window	304
8.3	Simulating Tests of Cooled Missile Windows	313
8.4	Wind Tunnel Tests of Turret and Cavity Model	339
	References	344

Chapter 9	Schlieren and Shadowgraph Method for Flow Visualization	347
9.1	Schlieren and Shadowgraph	348
9.2	Schlieren Optical System	367
9.3	Schlieren Apertures and Windows	392
9.4	Schlieren Equipment	406
	References	415

Chapter 10	Thin Laser-Sheet Scattering Technique for Flow Visualization	417
10.1	Particles Causing Scattering of Light	419
10.2	Compressible Shear/ Mixing Layer	422
10.3	Thin Laser-Sheet Scattering Principle	425

10.4	Experimental Method and Application	431
	References	443
Chapter 11 Interferometry for Flow Visualization and		
	Density Measurement	446
11.1	Optical Path Difference of Light Propagation	447
11.2	Double Beam Interferometry	459
11.3	Point Diffracting Interferometry	465
11.4	Holographic Interferometry	472
11.5	Shearing Interferometry	489
	References	503
Chapter 12 Beam Deflection and Wave-front Distortion		
	Measurement	506
12.1	Small Aperture Beam Technique	506
12.2	Wave-front Sensor Method	525
12.3	Photorefractive Crystal Modulator Method for Power Spectra Measurement of Turbulence	545
	References	564